

Universidad Autónoma de Sinaloa  
Facultad de ciencias Físico Matemáticas



DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALTO VOLTAJE PARA  
ACELERADORES DE PARTÍCULAS

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**Licenciado en electrónica**

PRESENTA:  
**Juan Francisco Verdugo Arredondo**

DIRECTOR:  
Dr. Carlos Duarte galván  
Dr. Christian Valerio Lizarraga

Culiacán, Sinaloa, 2018

*A mi esposa Mariana Gonzalez Acosta. A mis padres, Martha Aidé Arredondo Solís y Francisco Verdugo Fierro. A mis hermanos Dulce Esmeralda Verdugo Arredondo y Néstor Javier Espino Arredondo.  
Por ayudarme a crecer en cada aspecto de mi vida.  
Yo.*





# Reconocimientos

También quiero agradecer a mis grandes maestros que me enseñaron que la sabiduría se encuentra en la motivación y el trabajo duro, Dr. Carlos Duarte Galvan, Dr. Cristian Valerio, Dr. Roberto Millan, etc..

A mi Universidad y sus instituciones, por abrirme las puertas a esta gran casa de estudio, al parque de innovación tecnológico, por haberme formado de la mejor manera posible y por la infinidad de oportunidades que se abren tras el conocimiento que se me ha otorgado. Sin mas ¡Gracias!



# Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Juan Francisco Verdugo Arredondo. Culiacán, Sinaloa, 2017



# Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>xI</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>xIII</b>
<b>1. Resumen</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes y justificación . . . . .	3
1.2. Planteamiento del problema . . . . .	6
1.3. Hipótesis y objetivos . . . . .	7
1.3.1. Objetivo General . . . . .	7
1.3.2. Objetivo Particular . . . . .	7
1.3.3. Hipótesis . . . . .	7
1.4. Estructura de la tesis . . . . .	9
<b>2. Marco teórico</b>	<b>11</b>
2.1. Fuentes de voltaje en aceleradores de partículas . . . . .	11
2.2. Cálculo de capacidad de corriente en pistas de circuitos impresos . . . . .	16
2.3. Fuente de voltaje lineal . . . . .	21
2.3.1. Etapa de transformador monofásico . . . . .	22
2.3.2. Rectificador monofásico de onda completa . . . . .	25
2.3.3. Filtros . . . . .	26
2.3.4. Regulador . . . . .	28
2.4. Inversores de voltaje . . . . .	30
2.4.1. Parámetros de desempeño de un inversor . . . . .	31
2.5. Multiplicador de voltaje Cockcroft-Walton . . . . .	34
2.6. Aplicaciones de fuentes de alto voltaje . . . . .	36
2.6.1. Fusión nuclear . . . . .	36
2.6.2. Sistemas de encendido. . . . .	39
2.6.3. Generación de rayos X . . . . .	43
<b>3. Metodología</b>	<b>45</b>
3.1. Materiales utilizados . . . . .	47
3.2. Diseño del hardware . . . . .	50
3.2.1. Hardware de interface . . . . .	52
3.2.2. Hardware de fuente de voltaje a 180w . . . . .	53
3.2.3. Hardware inversor . . . . .	57
3.2.4. Multiplicador de voltaje Cockroft Walton . . . . .	59
3.3. Firmware . . . . .	62
3.3.1. Interface gráfica . . . . .	62

## ÍNDICE GENERAL

---

3.4. Implementación del Hardware . . . . .	85
3.4.1. Fuente de 180W . . . . .	86
3.4.2. Inversor de voltaje . . . . .	89
3.4.3. Multiplicador de voltaje . . . . .	91
<b>4. Análisis de Resultados</b>	<b>93</b>
4.1. Resultados . . . . .	93
<b>5. Conclusiones</b>	<b>97</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>99</b>

# Índice de figuras

2.1. Diagrama esquemático de las componentes principales de un acelerador de partículas.	13
2.2. Cálculo de ancho de pistas 1 . . . . .	20
2.3. Calculo de ancho de pistas 2 . . . . .	20
2.4. Estructura fuente lineal . . . . .	21
2.5. Principio de funcionamiento de un transformador monofásico. . . . .	23
2.6. Simbología de un transformador monofásico. . . . .	24
2.7. Simbología de un transformador monofásico. . . . .	25
2.8. Forma de onda de un voltaje filtrado que muestra voltajes de DC y de rizo. . . . .	27
2.9. Forma de onda de un voltaje filtrado que muestra voltajes de DC y de rizo. . . . .	27
2.10. Circuito en cascada Cockcroft-walton de media onda. . . . .	34
2.11. Reproducción del voltaje $V_o$ y el rizo $\delta V$ en la carga del circuito. . . . .	35
2.12. Proceso de fusión nuclear. . . . .	37
2.13. Fusor nuclear. . . . .	39
2.14. Inducción electromagnética. . . . .	40
2.15. Inducción electromagnética 2. . . . .	41
2.16. Estructura básica transformador de encendido. . . . .	42
2.17. Tubo de rayos X . . . . .	44
3.1. Sonda de alto voltaje . . . . .	47
3.2. Multímetro utilizado en experimento . . . . .	48
3.3. Osciloscopio utilizado en experimento . . . . .	48
3.4. Router CNC . . . . .	49
3.5. Topología de fuente de alto voltaje . . . . .	51
3.6. LCD-TFT para interface gráfica . . . . .	52
3.7. Simulación en LTSPICE fuente 180w . . . . .	54
3.8. Simulación en LTSPICE fuente 180w . . . . .	55
3.9. Simulación fuente regulable en LTSPICE . . . . .	55
3.10. Diseño placa de fuente de regulable de 180w . . . . .	56
3.11. Placa de desarrollo, puente H IBT-2 . . . . .	57
3.12. diagrama puente H . . . . .	58
3.13. Multiplicador de voltaje 2 niveles . . . . .	59
3.14. Multiplicador de voltaje sin carga . . . . .	60
3.15. Multiplicador de voltaje con 1 mA de carga . . . . .	60
3.16. Multiplicador de voltaje con 10 mA de carga . . . . .	60
3.17. Multiplicador de voltaje con 10 mA de carga . . . . .	63
3.18. Pantalla 1 . . . . .	68
3.19. Pantalla 2 . . . . .	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

3.20. Multiplicador de voltaje sin carga . . . . .	85
3.21. Multiplicador de voltaje sin carga . . . . .	86
3.22. Fuente 12V sin carga . . . . .	87
3.23. Fuente 12V con carga a 7.5 OHMS . . . . .	88
3.24. Fuente 12V con carga a 15 OHMS . . . . .	88
3.25. Implementacion experimento inversor. . . . .	90
3.26. Implementación inversor salida con carga inductiva. . . . .	90
3.27. Implementación inversor . . . . .	91
3.28. Implementación inversor . . . . .	92
4.1. Salida alto voltaje sin carga a 93v. . . . .	94
4.2. Salida alto voltaje sin carga a 200v. . . . .	94
4.3. Salida alto voltaje sin carga a 600v. . . . .	95
4.4. Salida alto voltaje sin carga a 986v. . . . .	95

# Índice de tablas



## Capítulo 1

# Resumen

El trabajo de esta tesis consiste en el desarrollo de una fuente de alto voltaje de bajo ruido para su uso en equipo científico de alta precisión, mediante la utilización de un sistema de inversor de voltaje y un rectificador del tipo multiplicador, Cockcroft–Walton, así como también la introducción a un control del sistema con lazo cerrado e interfaces gráficas para el usuario. Durante el desarrollo del sistema de alto voltaje se realizó el diseño, la simulación, la fabricación y la validación de los datos proporcionados por el sistema.

Obteniendo como resultado un sistema de bajo costo, el cual puede generar alto voltaje a 10w de potencia, obteniendo una comparación entre fuentes de alto voltaje comerciales implementadas en aceleradores de partículas y reactores nucleares de baja potencia.

Como resultado de esta tesis se muestra una comparación entre

## 1. RESUMEN

el diseño realizado y una fuente de alto voltaje comercial de la marca “CAEN” las cuales han sido sometidas a cargas similares a las utilizadas en laboratorios alrededor del mundo.

### 1.1. Antecedentes y justificación

Uno de los mayores avances tecnológicos de la humanidad ha sido el desarrollo de aceleradores de partículas, ya que tienen grandes aplicaciones en las áreas médicas, militares y alimentarias. Podemos hacer referencia, en medicina, a un hecho actual, el veinte porciento de los fármacos radiactivos que se inyectan en los pacientes son producidos en aceleradores del tipo sincrotrón (1). Los cuales aceleran los protones típicamente a energías de 40 MeV. Estos aceleradores son diseñados para funcionar de manera confiable produciendo haces de alta intensidad con un mínimo de intervención humana, he allí la meta en esta tesis.

En el pasado la radioterapia utilizaba agujas de radio o rayos gamma de cobalto radioactivo, la desventaja de este tipo de maquinaria es que tienen que tener un funcionamiento ininterrumpido, y con el pasar del tiempo su energía decae y es necesario cambiar la fuente radioactiva y resguardarla del medio ambiente, la cual representa un peligro para la humanidad y un problema sin solución actual, ya que la contaminación es latente.

Otro de los tantos ejemplos de las aplicaciones de estas tecnolo-

## 1. RESUMEN

---

gías es en la rama de la fusión nuclear, ya que estas requieren fuentes de alto voltaje para su funcionamiento, en México existe desarrollo en esta área. En la parte experimental, en 1978 se inició un proyecto mexicano de fusión termonuclear y, en 1983, se propuso el diseño de una pequeña máquina experimental llamada “Novillo”. Este Tokamak fue diseñado y construido por trabajadores mexicanos del ININ (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares) en el Centro Nuclear de Salazar, México. El trabajo con este acelerador, permitirá que el país se incorpore a una de las áreas de investigación en Física de Plasmas más prometedoras para el futuro energético. La infraestructura existente y la experiencia adquirida, permitirán contribuir al desarrollo de una futura aplicación de la energía nuclear de fusión, la cual será una fuente alterna de energía en el presente siglo. La continuación de investigaciones en fusión permitirá a México, el ingreso a programas del Organismo Internacional de Energía Atómica(2).

Bajo la premisa de la ventaja del desarrollo tecnológico de los aceleradores de partículas para nuestro país, es necesario comenzar los estudios en estos temas, ya que las posibilidades de aplicación son bastas y de suma importancia. Con el pasar del tiempo las aplicaciones han aumentado considerablemente, desde ramas de la medicina

como ya lo mencionamos, hasta sistemas de aislamiento por campo magnético de plasmas y sistemas para aumentar temperaturas hasta puntos de fusión para sistemas de generación de energía en plantas de fusión nuclear, los mexicanos han apostado por la participación en el desarrollo de estas tecnologías.

Este trabajo de tesis pretende dar un pequeño acercamiento a temas relacionados con los ya antes mencionados, mediante el desarrollo de la instrumentación de una fuente de alto voltaje para un acelerador de electrones lineal, el cual se divide en varias etapas de desarrollo, la primera es el sistema de fuentes, nos basaremos en el desarrollo echo por Cockroft-Walton (CW) (1932) combinado con un inversor de voltaje a alta frecuencia incidente en un embobinado de ignición controlado digitalmente mediante un microcontrolador a lazo cerrado, el cual cuenta con una comunicación PC-HPS (HIGH POWER SUPPLY), permitiendo al usuario, mediante una retroalimentación, configurar la fuente de voltaje a los parámetros deseados, así como también guardar un registro en las variaciones de corriente y voltaje a la que nuestra fuente es sometida.

## 1.2. Planteamiento del problema

Hoy en día el desarrollo de tecnologías que involucran aceleradores de partículas esta cada vez mas presentes en la vida diaria, en México ya existe participación en desarrollo de gran nivel, como lo es el Instituto de Investigaciones Nucleares (ININ) y distintos laboratorios de gran importancia en nuestro país, lo cual brinda la posibilidad a los investigadores de involucrarse en este tipo de desarrollo para poder satisfacer las necesidades que se requieren.

El uso de aceleradores de partículas para aplicaciones medicas ha tenido gran auge en los últimos años, ya que las ventajas que tienen sobre las fuentes radioactivas son bastas, este echo da la oportunidad a las universidades de preparar expertos en estos temas y diseñar maquinaria a medida, que cumpla las exigencias de la región. Aunque ya existen trabajos referentes a fuentes de alto voltaje, generación de electrones mediante telurio y detectores de estos mismos, la curva de aprendizaje necesaria para especializarse en estos temas es grande y dejar un precedente en nuestro país es necesaria y muy útil, es por ello que estas investigaciones son de gran importancia.

### **1.3. Hipótesis y objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Este trabajo tiene por objetivo desarrollar una fuente de alto voltaje de hasta 2 KV y 10 W de potencia.

#### **1.3.2. Objetivo Particular**

- Desarrollo de fuente estable de alto voltaje.
  - Diseño de fuente de voltaje a 12V, 180W y bajo ruido.
  - Simulación de fuente de voltaje a 12V.
  - Construcción de fuente de voltaje 12V.
  - Diseño de driver modulador de ancho de pulso (PWM) bipolar para inversor.
  - Simulación de driver generador de PWM bipolar.
  - Construcción de driver (PWM) bipolar.
  - Diseño de interfaces gráficas para control de inversor
  - Mediciones y comparaciones entre fuentes comerciales.
  - Análisis de costos

#### **1.3.3. Hipótesis**

El diseño adecuado de un sistema de generación de alto voltaje nos permite llevar a cabo experimentos y de alta precisión, con el cual

## **1. RESUMEN**

---

se podrá desarrollar tecnología aplicada en esta área.

#### **1.4. Estructura de la tesis**

Este trabajo está dividido en 5 capítulos. El primero habla sobre un resumen del trabajo realizado, el segundo es un marco teórico que pone en contexto el desarrollo del proyecto y expone las partes técnicas, en el capítulo 3 se expone el proceso y la metodología realizada, el capítulo 4 incluye un breve análisis de resultados el cual muestra una síntesis de las mediciones y el trabajo teórico, y por ultimo un análisis de resultados.



## Capítulo 2

# Marco teórico

### **2.1. Fuentes de voltaje en aceleradores de partículas**

Después de la construcción del primer acelerador, en la misma década de los 30, se inventaron otros tipos de aceleradores tales como el ciclotrón, los aceleradores lineales y los aceleradores tipo Van de Graaff. Debido a que los primeros aceleradores de partículas se construyeron con el fin de estudiar experimentalmente la estructura del núcleo atómico, por medio de colisiones, las cuales podían originar transmutaciones o reacciones nucleares, esa fue la razón por lo que al hablar de un acelerador se asociaba automáticamente con un laboratorio de física nuclear. La importancia de estos instrumentos de física nuclear es similar a la del telescopio en astronomía o al microscopio en bacteriología.

Actualmente el uso de los aceleradores se ha extendido a otras

## 2. MARCO TEÓRICO

áreas de investigación básica como la física atómica el mundo de los electrones y en las partículas elementales. Los aceleradores en medicina se usan tanto en los departamentos de radiología, para destruir tumores malignos, como para producir radioisótopos que se utilizan en el diagnóstico de enfermedades (medicina nuclear). El uso de los aceleradores en aplicaciones tecnológicas es muy variado y el más conocido es en las industria de los semiconductores y de la núcleo-electrónica, las cuales se usan un tipo especial de aceleradores conocidos como implantadores con los que es posible producir los chips electrónicos, circuitos integrados, etc

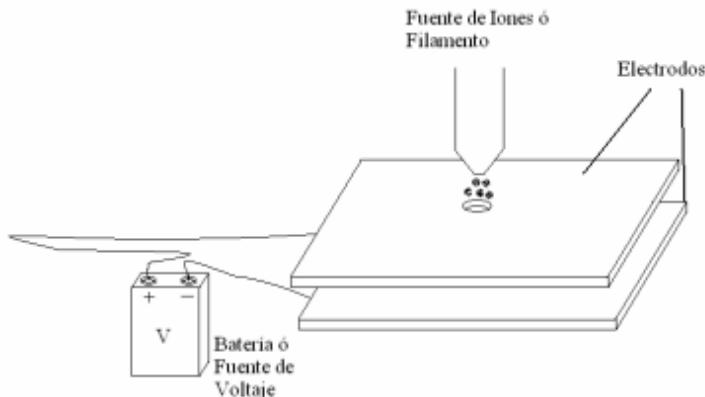
Los aceleradores son instrumentos relativamente complejos y su diseño y construcción requiere de alta tecnología e intervienen muchos campos de la ingeniería. Una forma de clasificar los aceleradores es por la energía de los proyectiles y los de alta energía o superaceleradores están instalados, por ejemplo en algunos laboratorios nacionales de los EUA, tal como, en Los Alamos, Brookhaven, FermiLab y en Europa en el CERN.

Las instalaciones de estos superaceleradores son impresionantes por su gran tamaño y los cientos de toneladas de materiales que se requirieron para su construcción. Por ejemplo, el acelerador en el

FermiLab es circular y tiene un radio de 1 Km. Sin embargo los conceptos sobre los principios de operación de los super-aceleradores y de los pequeños aceleradores son los mismos y son simples y se describen a continuación.

Un diagrama simplificado de un acelerador de partículas se muestra esquemáticamente en la figura 2.1 y cuyos elementos básicos son:

- 1) Fuente de voltaje
- 2) Fuente de iones (en el esquema es un filamento)
- 3) Electrodos.



**Figura 2.1:** Diagrama esquemático de las componentes principales de un acelerador de partículas.

## 2. MARCO TEÓRICO

---

El principio de funcionamiento del cualquier tipo de acelerador, se basa en la interacción de los campos eléctricos producidos por fuentes de voltaje sobre la carga eléctrica de las partículas generadas en la fuente de iones y esta es la razón por la que no se pueden acelerar partículas neutras.

Otras partes importantes asociadas a un acelerador son equipos periféricos tales como: sistemas de vacío, líneas de transporte de haz, cámaras de experimentación, etc. Un tubo de rayos X y el cinescopio de una TV doméstica según la definición anterior son aceleradores de partículas, sin embargo, en la práctica no se les refiere con este nombre.

Como se sabe, las unidades que se usan para la energía en física son los julios y/o ergios. Sin embargo, para cuantificar la energía de los proyectiles acelerados se acostumbra usar unidades de electrón-volt (eV) o sus múltiples: el  $keV = 1\ 000\ eV$ , el  $MeV = 1000000eV$ , el  $TeV = 10^{12}eV$ , etc. El uso de estas unidades de energía es debido a la relación simple de la ecuación anterior, en la cual la energía es numéricamente igual al voltaje. De acuerdo con la ecuación anterior, una energía de 1 eV es el cambio de energía cinética que experimenta una partícula con carga en valor absoluto igual a la del electrón,

después de pasar por una diferencia de potencial de un volt. (9)

## 2.2. Cálculo de capacidad de corriente en pistas de circuitos impresos

Antes de comenzar con la fabricación de un diseño de PCBs se debe de considerar el tamaño de pistas necesarios para el manejo de corrientes para cada circuito desarrollado, por esa razón mediante un análisis se debe avanzar en el diseño. En la actualidad los desarrolladores llevan a reducir el ancho de las pistas y espacios, debido a que se desarrollan componentes cada vez más pequeños y sistemas igualmente más compactos, esto obliga a adaptarse a estos nuevos requerimientos.

Para encontrar una solución a esta eventualidad es necesario recurrir a estudios en estos temas que nos permita acercarnos al límite y para ello debemos de considerar todos los parámetros que influyan en nuestro sistema, obteniendo así resultados más precisos. En nuestro caso nos basaremos en los gráficos publicados en el IPC2152 (3) “Standard for Determining Current Carry Capacity in Printed Board Design” en 2009, este estándar es ampliamente utilizado en muchos proyectos que requieran este tipo de análisis.

Para el correcto entendimiento de los procesos que influyen en las

pistas por el paso de la corriente debemos de recordar que el paso de la corriente por un conductor produce en este una caída de potencial que esta gobernada por la ley de OHM ( $R=V/I$ ), esta caída de potencial se disipa en forma de calor por el efecto Joule  $Q = I^2Rt$ . En nuestro el conductor es nuestra pista, su resistencia depende de varios factores, pero lo principal es su sección (ancho x espesor) y su longitud. El efecto térmico es en realidad el que nos interesa conocer al momento del dimensionamiento de la PCB. Por esta razón, para poder calcular una capacidad de transporte de corriente, hay que analizarlo en términos de incremento de temperatura. Fijando como un incremento maxico admisible.

Existen algunos parámetros que se deben de considerar importantes de conocer, ya que los mismos alteran o modifican el comportamiento térmico de la pista, afectando de manera significativa, los mas importantes son:

- Corriente eléctrica que circula.
- Tipo de material base.
- Cálculo de corriente de pistas.
- Sección de la pista.

- Espesor del laminado de cobre.
- Espesor de la placa.
- Presencia de planos de tierra o grandes áreas de cobre.
- Ambiente de aplicación (gabinete, forzadores de aire, vacío, etc.)

Considerar todos estos parámetros en un modelo es bastante complicado, tanto que, en sí, el estándar fue fijado por medio de ensayos y presentando los resultados en forma de curvas. Mediante estos datos empíricos se hace una aproximación que se acerque al límite que deseamos, tomando en cuenta que es importante sobredimensionar dichos límites.

El cálculo que se realiza se basa en el fijado de una variación máxima de temperaturas admisibles. La variación térmica se define como un aumento de temperatura por encima de la temperatura inicial que experimenta el conductor.

Para el cálculo se requieren los gráficos ya antes mencionados que son dos. El primer gráfico es una de las tres entradas y se trata de una serie de curvas que corresponden a los incrementos de temperatura desde diez a cien grados centígrados. En el eje de las ordenadas se gráfica la corriente máxima en amperes y en el de las abscisas obtenemos la sección de la pista en milésimas de pulgada

cuadrada. El segundo gráfico tiene de igual manera tres entradas y en esta se centra en el espesor del cobre, adoptando los valores típicos en los que se fabrican las PCBs, llegando desde 0.5 hasta 3 Oz/ft<sup>2</sup>.

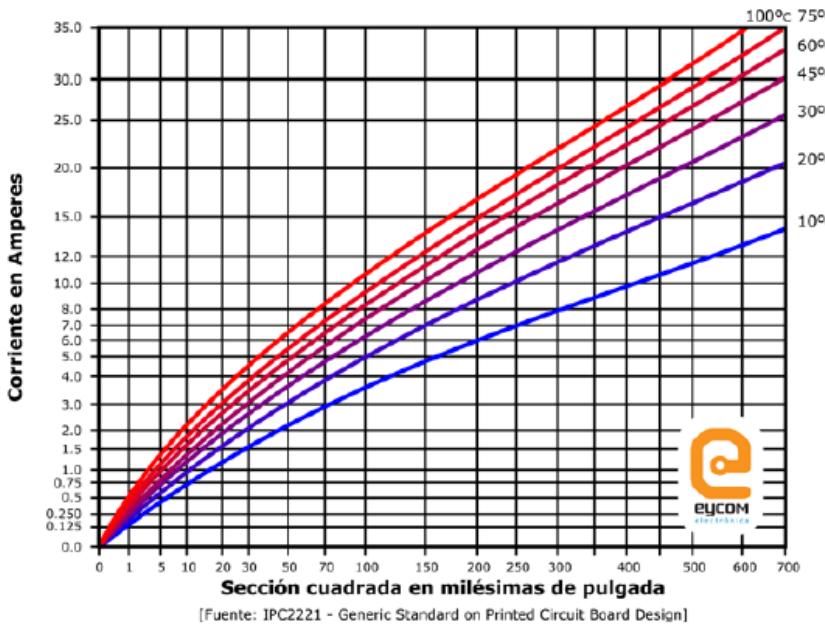
Los cálculos necesarios son sencillos y claros de realizar, para ello necesitaremos los siguientes datos:

- Corriente máxima a soportar.
- Incremento máximo de temperatura admisible.
- Espesor de cobre del material utilizado.

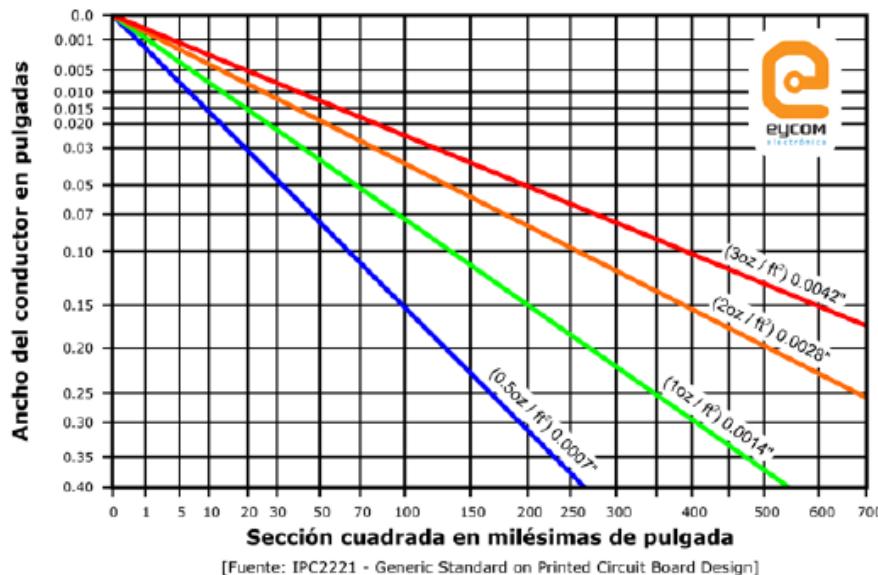
Utilizando el valor de corriente nos ubicamos en la figura 2.2 por el eje de las ordenadas y proyectamos el valor en forma paralela al eje de las abscisas hasta interceptar la curva que corresponde a la temperatura máxima admisible, luego en la figura 2.3 tomamos el punto en las ordenadas hasta obtener el valor de las abscisas que le corresponde. Ese valor es el valor de la sección cuadrada que debe de tener la pista.

## 2. MARCO TEÓRICO

---



**Figura 2.2:** Cálculo de ancho de pistas 1



**Figura 2.3:** Calculo de ancho de pistas 2

### 2.3. Fuente de voltaje lineal

Es común en proyectos de electrónica no especializados la utilización de diferentes tipos de fuentes de voltaje, entre las que se encuentran fuentes lineales, conmutadas, boost o tipo buck y los problemas que puede causar la falta de atención en este punto tan crucial pueden afectar los resultados finales de un proyecto. Es por ello que se necesita conocer los principios fundamentales que reínan a este tipo de sistemas, los cuales intervienen directamente en el comportamiento de nuestro proyecto al nivel más básico.

La fuente de voltaje lineal consiste en un sistema sencillo y estructurado, el cual se diseña en diferentes configuraciones en cada módulo a partir del tipo de carga que requiere el proyecto. Para ello podemos observar en la figura 2.5 de manera ilustrativa el orden de la estructura básica de una fuente lineal.



**Figura 2.4:** Estructura fuente lineal

De manera independiente podemos analizar cada aspecto presentado en la imagen, el cual, de uno en uno se va realizando un análisis para definir los valores y topologías que satisfacen las ne-

## **2. MARCO TEÓRICO**

---

cesidades requeridas. Tomando en cuenta lo mencionado podemos comenzar a definir las ecuaciones y modelos existentes.

### **2.3.1. Etapa de transformador monofásico**

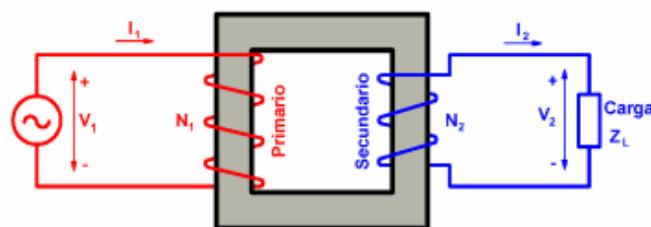
Esta etapa consta básicamente de un transformador que esta formado por un bobinado primario y uno o varios bobinados secundario, que tiene como función principal convertir la energía eléctrica alterna de la red, en energía alterna de otro nivel de voltaje, por medio de la acción de un campo magnético. Ademas provee una aislación galvánica entre la entrada y la salida.

Los transformadores son máquinas estáticas con dos devanados, de corriente alterna enrollados sobre un núcleo magnético. El devanado por donde entra energía al transformador se denomina primario y el devanado por donde sale energía hacia las cargas que son alimentadas por el transformador se denomina secundario. El devanado primario tiene  $N_1$  espiras y el secundario tiene  $N_2$  espiras. El circuito magnético de esta máquina lo constituye un núcleo magnético sin entrehierros, el cual no está realizado con hierro macizo sino con chapas de acero silicio apiladas y aisladas entre sí. De esta manera se reducen las pérdidas magnéticas del transformador.

Al inducir una corriente sobre cualquiera de los dos devanados se

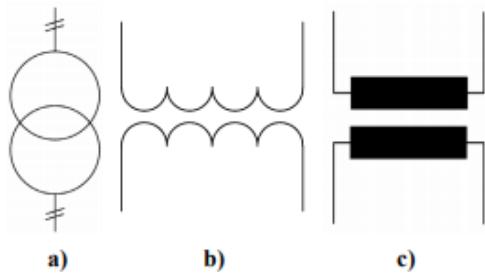
genera un flujo alterno en el núcleo magnético. Este flujo magnético se describe mediante la Ley de Faraday(13) y produce una fuerza electromotriz que da lugar a una tensión  $V_2$  en los bornes de dicho devanado.

Normalmente, para un transformador reductor o un transformador elevador tienen dos devanados que se denominan de alta tensión y de baja tensión, siendo bobina primaria y bobina secundaria respectivamente. Un mismo transformador puede alimentarse por el lado alta tensión (A.T.) y funcionar como transformador reductor o alimentarse por el lado de baja tensión (B.T.) y actuar como un transformador elevador.



**Figura 2.5:** Principio de funcionamiento de un transformador monofásico.

En la figura 2.6 podemos observar los símbolos más comunes que representan al transformador.



**Figura 2.6:** Simbología de un transformador monofásico.

Ahora podemos definir los valores asignados o nominales para el diseño de un transformador.

Las **tensiones asignadas o nominales** ( $V_1, V_2$ ) son aquellas para las que se ha diseñado el transformador, estas tensiones son proporcionales al numero de espiras ( $N_1, N_2$ ) de cada devanado.

La **potencia asignada o nominal** ( $S_N$ ) la cual permite un funcionamiento sin calentamientos peligrosos en su funcionamiento normal. Cabe mencionar que los dos devanados siempre tendrán la misma potencia asignada.

Las **corrientes nominales o asignadas** ( $I_{1N}, I_{2N}$ ) se obtienen a partir de las tensiones asignadas y de la potencia asignada. Así, en un transformador monofásico se tiene que:

$$S_N = V_{1N} * I_{1N} = V_{2N} * I_{2N} \quad (2.1)$$

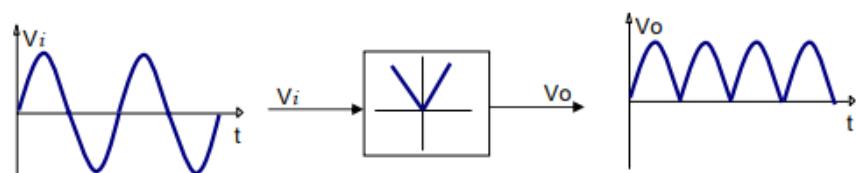
La **relación de transformación** ( $m$ ) es el cociente entre las tensiones asignadas del primario y del secundario:

$$m = \frac{V_{1N}}{V_{2N}} \quad (2.2)$$

Estudiando superficialmente los aspectos de construcción de un transformador, mediante estas ecuaciones podemos comenzar con la construcción y diseño. Debemos de considerar las potencias necesarias para nuestro proyecto y mediante ellas calcular el ancho del cobre y el tamaño del entre-hierro.(4)

### 2.3.2. Rectificador monofásico de onda completa

El circuito rectificador de onda completa genera una señal de corriente directa (D.C.) a partir de una señal de corriente alterna (A.C.) con todos los semiciclos de la señal, invirtiendo todos los semiciclos de una misma polaridad, para convertirlos a la otra.



**Figura 2.7:** Simbología de un transformador monofásico.

Para calcular el voltaje de D.C. que obtendremos podemos utilizar la siguiente ecuación(5)

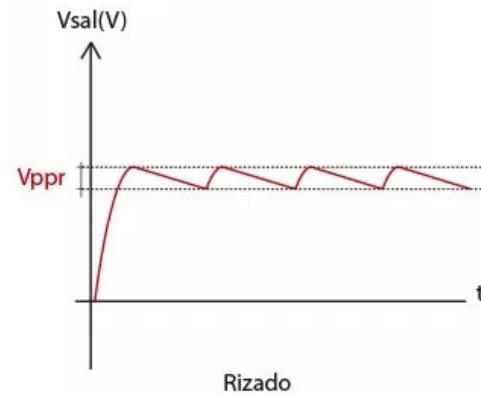
$$V_{cd} = 2 * 0.636V_m \quad (2.3)$$

### 2.3.3. Filtros

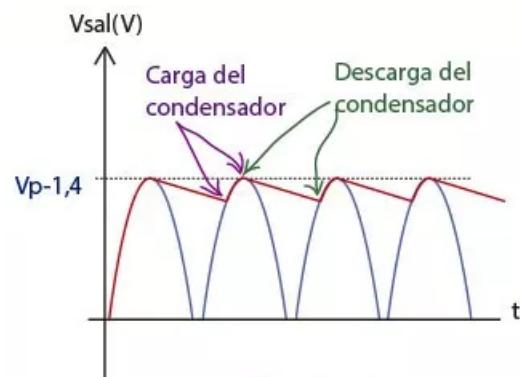
El voltaje de CA por lo general se conecta a un transformador, el cual lo reduce al nivel de salida de DC deseado. Un rectificador de diodos proporciona entonces un voltaje rectificado de onda completa, el cual en principio se pasa por un filtro de capacitor sencillo para producir un voltaje de DC. El cual en todos los casos presenta un voltaje de rizo o variación de voltaje de CA.

Para calcular el voltaje de rizo podemos utilizar un multímetro con capacidad de medir voltaje en CA (TRUE RMS) y el voltaje de DC. El voltmetro de CD leerá solo el nivel promedio. El medidor de CA (RMS) leerá solo el valor RMS del componente de ca del voltaje de salida. Entonces, definimos el rizo como:

$$r = \frac{\text{voltaje de rizo (rms)}}{\text{voltaje de DC}} = V_{cd} \cdot 100 \% \quad (2.4)$$



**Figura 2.8:** Forma de onda de un voltaje filtrado que muestra voltajes de DC y de rizo.



**Figura 2.9:** Forma de onda de un voltaje filtrado que muestra voltajes de DC y de rizo.

Para nuestro caso utilizaremos un filtro de capacitor. Se conecta un capacitor en la salida del rectificador y se obtiene un voltaje de dc a través del capacitor como se muestra en la figura 2.8 y 2.9. Podemos calcular el **voltaje del rizo** que obtendremos mediante la ecuación:

$$V_r(rms) = \frac{I_{cd}}{4\sqrt{3}fC} = \frac{2.4V_{cd}}{R_L C} \quad (2.5)$$

Con la ecuación 2.4 podemos intuir y definir la expresión para el **rizo** de la forma de onda de salida de un rectificador de onda completa y el circuito de capacitor de filtrado:

$$r = \frac{V_r I_{cd}}{CV_{cd}} * 100 \% = \frac{2.4}{R_L C} \quad (2.6)$$

#### 2.3.4. Regulador

Un factor de importancia en una fuente de alimentación es la cantidad de cambios de voltaje de salida de DC a lo largo de la operación de un circuito. El voltaje provisto a la salida en la condición sin carga (sin que demande corriente de la fuente) se reduce cuando se extrae corriente de carga de la fuente. La cantidad que el voltaje de DC cambia entre las condiciones sin carga y con carga la describe un factor llamado regulación de voltaje, para una fuente ideal la regulación de voltaje sería del 0 %. Entonces podemos definir la regulación de voltaje como:

$$\text{Regulación de voltaje} = \frac{\text{Voltaje sin carga} - \text{Voltaje con carga}}{\text{voltaje con carga}}$$

$$\%V.R. = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} * 100 \% \quad (2.7)$$

## 2.4. Inversores de voltaje

Los convertidores DC a AC se conocen como inversores. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de DC a un voltaje simétrico de salida de AC de magnitud y frecuencia deseada.

Los inversores se pueden clasificar ampliamente en dos tipos: inversores monofásicos e inversores trifásicos. Cada tipo puede usar dispositivos de encendido y apagado controlados, por ejemplo **transistor de unión bipolar** (BJT), **transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor**(MOSFET),**transistor bipolar de puer- ta aislada** (IGBT), etc. Por lo general estos inversores utilizan señales de control de PWM para producir un voltaje de salida de CA.

Existen diferentes tipos de inversores, un inversor se conoce como **inversor alimentado por voltaje** (VFI) si el voltaje de entrada permanece constante; **inversor alimentado por corriente** (CFI) si el voltaje de entrada permanece constante, e **inversor enlazado en cd variable** si el voltaje de entrada es controlable. Si al voltaje o a la corriente de salida del inversor se le hace pasar a través de cero al crear un circuito LC resonante, a este tipo de inversores se le conoce como **inversor de pulso resonante**, y tiene vastas aplicaciones en la electrónica de potencia.

#### 2.4.1. Parámetros de desempeño de un inversor

El voltaje de entrada a un inversor es de DC y el voltaje de salida de AC. Idealmente la salida debe de ser una onda sinusoidal pura, pero contiene armónicos o rizos como se muestra en la figura 2.8. El inversor consume corriente de la fuente de entrada de DC solo cuando se conecta la carga al sistema, afectando la calidad de la señal de salida, es por ello que una medición variará conforme se conecte una carga diferente. Por lo común la calidad de un inversor se evalúa en función de los siguientes parámetros de desempeño:

La potencia de salida está dada por:

$$P_{ca} = I_0 V_0 \cos \theta \quad (2.8)$$

$$P_{ca} = I_0^2 R \quad (2.9)$$

Donde  $V_0$  e  $I_0$  son el voltaje y corriente RMS de la carga,  $\theta$  es el ángulo de la impedancia de la carga y  $R$  es la resistencia de la carga.

La potencia de entrada de CA del inversor es:

$$P_S = I_S V_S \quad (2.10)$$

donde  $V_S$  e  $I_S$  son el voltaje y la corriente promedio de entrada.

El contenido de rizo rms de la corriente de entrada es:

$$I_R = \sqrt{I_I^2 - I_S^2} \quad (2.11)$$

donde  $I_I$  e  $I_S$  son los valores rms y promedio de la corriente de suministro de cd. El factor de rizo de la corriente de entrada es:

$$RF_s = \frac{I_r}{I_s} \quad (2.12)$$

La eficiencia de potencia, la cual es la relación de la potencia de salida a la potencia de entrada, dependerá de las perdidas por conmutación, que a su vez dependen de la frecuencia de conmutación del inversor.

Factor armónico del n-ésimo armónico ( $HF_n$ ). El factor armonico (del n-ésimo armonico) que mide la contribuciónarmónica individual, se define como

$$HF_n = \frac{V_{on}}{V_{o1}}, \text{ para } n > 1 \quad (2.13)$$

donde  $V_{o1}$  es el valor rms del componente fundamental y  $V_{ob}$  es el

valor rms del n-ésimo componente armónico.

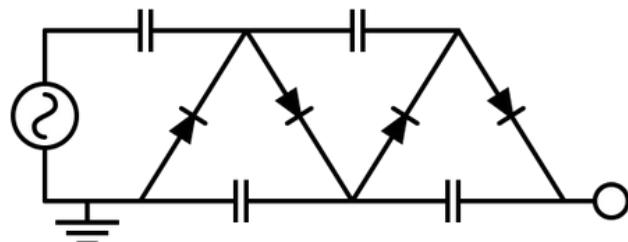
Distorsión armónica total (THD). La distorsión armónica total, que mide la cercanía en cuanto a forma de onda y su componente fundamental, se define como:

$$THD = \frac{1}{V_{O1}} \left( \sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_{on}^2 \right)^{1/2} \quad (2.14)$$

Factor de distorsión (DF).

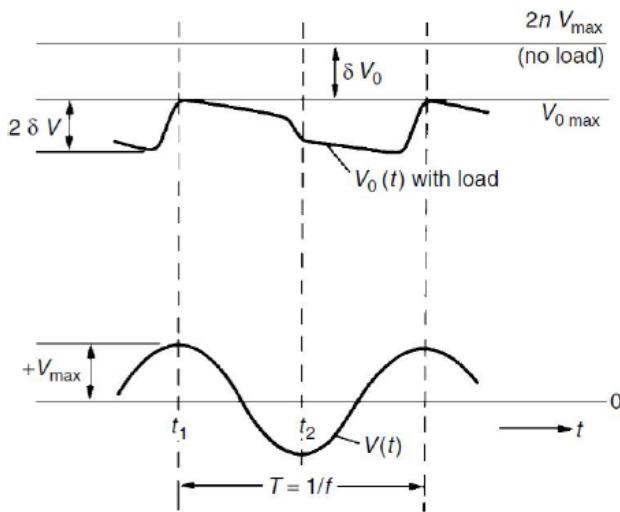
## 2.5. Multiplicador de voltaje Cockcroft-Walton

Cockcroft-Walton es un multiplicador de voltaje desarrollado para fines nucleares (6). Este generador consiste en un arreglo en cascada de diodos y capacitores para generar alto voltaje en CC mediante una entrada de voltaje en CA. El sistema Cockcroft-Walton es usado principalmente en aceleradores de partículas, pero también en sistemas láser, tubos CRT, LCDs, fuentes de voltaje y sistemas de rayos X. Podemos observar el sistema en cuestión en la figura 2.10.



**Figura 2.10:** Circuito en cascada Cockcroft-walton de media onda.

El sistema multiplicador es bastante sencillo pero existen algunos temas imprescindibles los cuales tenemos que estudiar a profundidad, ya que el funcionamiento fundamental de un capacitor es la carga y descarga del mismo, es por ello que los parámetros del componente deben de ser calculados metódicamente.



**Figura 2.11:** Reproducción del voltaje  $V_o$  y el rizo  $\delta V$  en la carga del circuito.

$$\delta V = \frac{i}{fC} \frac{n(n+1)}{4} \quad (2.15)$$

$$V \approx 2nV - \frac{2n^3}{3fC} \quad (2.16)$$

Es por ello que mediante un análisis matemático debemos de hacer el cálculo de la respectiva  $\delta$  del mismo.

No solamente la calidad de la salida depende de lo antes mencionado, ya que, para un correcto funcionamiento necesitamos realizar un sistema de entrada estable y constante. De aquí el siguiente estudio.

## **2.6. Aplicaciones de fuentes de alto voltaje .**

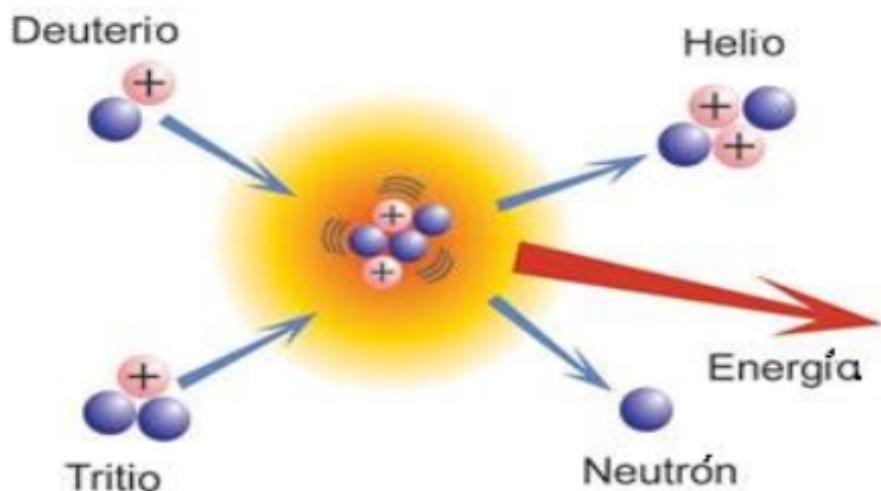
Los transformadores de alto voltaje son utilizados ampliamente en sistemas tanto industriales, médicos como de investigación. Una de estas tantas aplicaciones son los sistemas de ignición, ya que, por el alto voltaje que tenemos en el secundario se producen arcos eléctricos en situaciones controladas, que pueden servir para ignición de combustoleos. En el área de la medicina también se utiliza de manera importante en sistemas de generación de ozono, rayos X, entre tantas otras cosas más.

### **2.6.1. Fusión nuclear**

Es aquella en la que se unen dos núcleos ligeros para formar otro más pesado. Este proceso genera energía porque el peso del núcleo resultante es menor que la suma de los pesos de los núcleos más ligeros. Esta diferencia en las masas, llamado defecto de masa o energía de amarre, se transforma en energía mediante la fórmula de Einstein, donde  $m$  es la diferencia de masa observada en el sistema antes y después de la fusión y  $c$  es la velocidad de la luz (300.000 km/s). Aunque el defecto de masa es muy pequeño, es una energía muy concentrada ya que en un gramo de materia hay millones de átomos, con lo que una pequeña cantidad de combustible proporcio-

naría una cantidad grande de energía.

Este tipo de reacciones es la que tiene lugar en el interior de las estrellas, proporcionándoles su brillo y su producción energética. En la escala terrestre, los experimentos realizados sobre fusión nuclear enfrentan un problema de primer orden: la dificultad de controlar las enormes cantidades de energía que se producen en el proceso.



**Figura 2.12:** Proceso de fusión nuclear.

La fusión nuclear es un proceso del que potencialmente se puede obtener energía a gran escala y que puede ser muy útil para cubrir el esperado aumento de demanda de energía a nivel mundial. Sus principales ventajas respecto a otros tipos de fuentes energéticas son:

Los combustibles primarios son baratos, abundantes, no radioac-

## 2. MARCO TEÓRICO

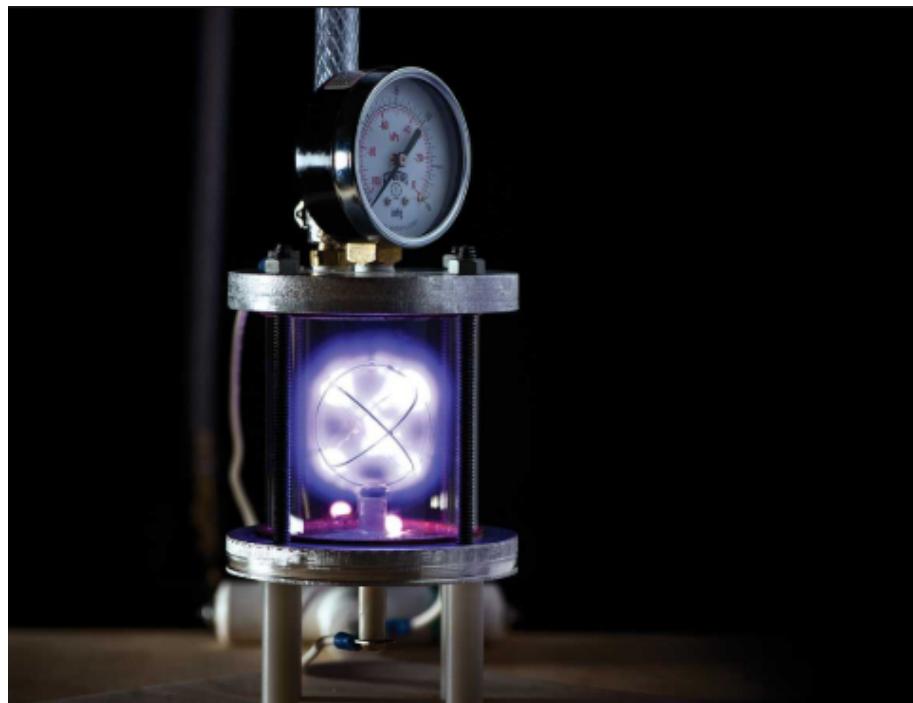
tivos y repartidos geográficamente de manera uniforme (el agua de los lagos y los océanos contiene hidrógeno pesado suficiente para millones de años, al ritmo actual de consumo de energía).

Sistema intrínsecamente seguro: el reactor sólo contiene el combustible necesario para los diez segundos siguientes de operación. Además el medio ambiente no sufre ninguna agresión: no hay contaminación atmosférica que provoque la “lluvia ácida” o el “efecto invernadero”.

La radiactividad de la estructura del reactor, producida por los neutrones emitidos en las reacciones de fusión, puede ser minimizada escogiendo cuidadosamente materiales de baja activación. Por tanto, no es preciso almacenar los elementos del reactor durante cientos o miles de años. (12)

Existen diferentes tipos de métodos para lograr fusión nuclear. Uno de los mas utilizados por científicos aficionados al tema es el llamado Fusor Farnsworth (11), el cual se emplea una técnica denominada confinamiento electrostático. En este aparato se emplean técnicas de vacío, alto voltaje, detección de neutrones y manejo de gases. Su nivel de peligrosidad es grande. Este es uno de los pro-

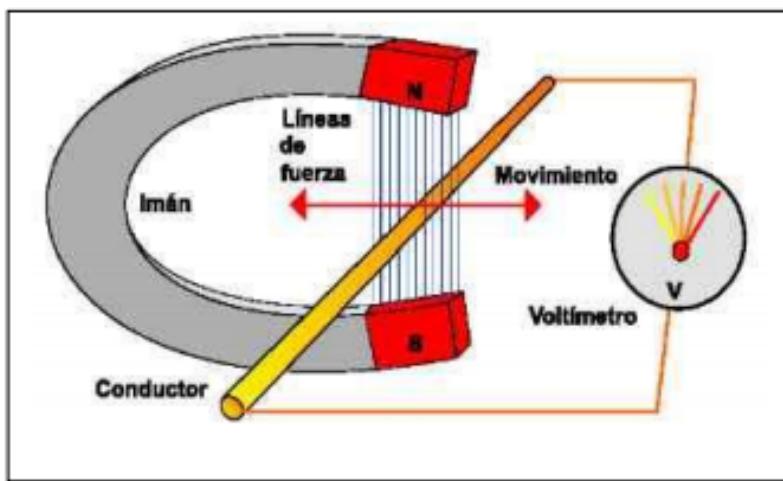
yectos mas ambiciosos que un aficionado puede acometer ya que supone el dominio de unas técnicas solo accesibles a aficionados bastante experimentados.



**Figura 2.13:** Fusor nuclear.

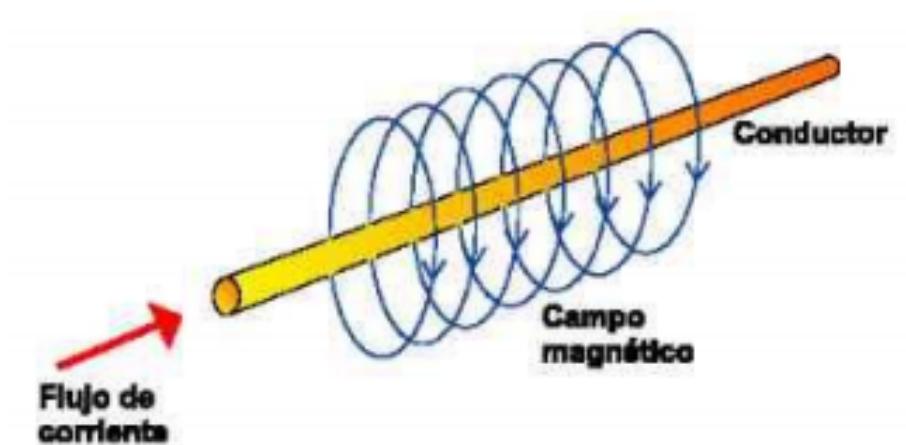
#### 2.6.2. Sistemas de encendido.

Cuando las líneas de fuerza de un campo magnético son interrumpidas por un conductor (alambre) en movimiento, se crea en éste una corriente eléctrica. Este fenómeno es conocido con el nombre de inducción electromagnética.



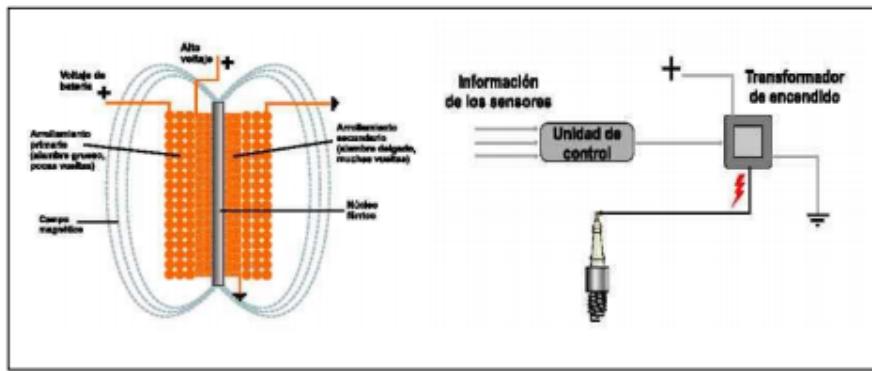
**Figura 2.14:** Inducción electromagnética.

“Este fenómeno se manifiesta de igual manera ya sea que se mueva el campo magnético, el conductor o ambos. Obviamente, el voltaje inducido en el conductor variará según la intensidad del campo magnético pero también tendrá que ver la velocidad con que se mueva el conductor o el campo magnético. Asimismo, si enrollamos el conductor formando una bobina y con ella interrumpimos las líneas de fuerza, el voltaje en el conductor se multiplicará tantas veces como vueltas del alambre pasen a través del campo.”



**Figura 2.15:** Inducción electromagnética 2.

En la figura 2.14 se aprecia la estructura básica de un transformador de encendido. La corriente de la batería (12V) fluye por el arrollamiento primario y crea un potente campo magnético que se concentra en el núcleo y envuelve al arrollamiento secundario. Al interrumpirse la corriente por medio del sistema electrónico de encendido, el campo se colapsa hacia el núcleo ferroso atravesando en su camino al arrollamiento secundario donde se induce un elevado voltaje (35 000 V aprox.) Este proceso de carga y descarga del transformador se repite tan rápido como lo requiera el régimen del motor para el encendido de las bujías



**Figura 2.16:** Estructura básica transformador de encendido.

El encendido electrónico es un concepto muy amplio pues existen tantos sistemas diferentes como recursos tecnológicos. Algunos sistemas a base de transistores; otros con sistema Hall y algunos más que utilizan un reluctor, todos realizan, a un nivel de alta tecnología, lo que el sistema mecánico de platino desempeñó durante muchos años para lograr el mismo objetivo.

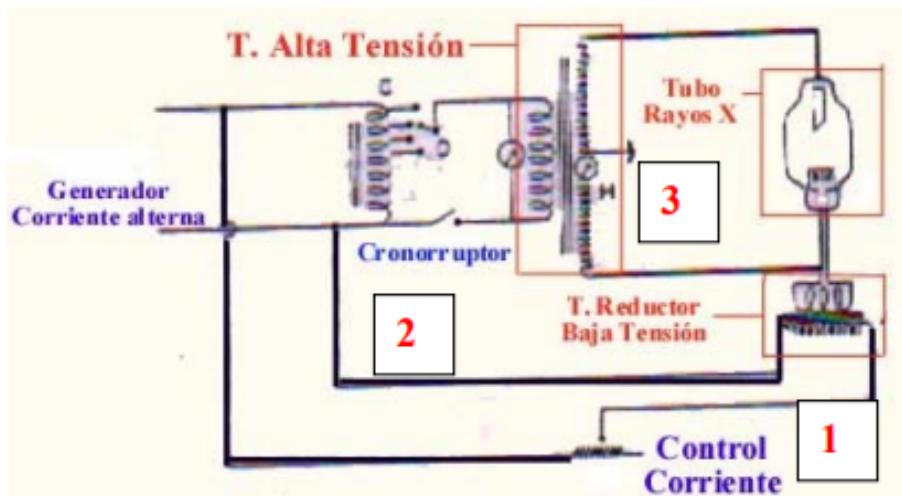
Sobre estas líneas se encuentra un esquema muy simplificado de un sistema de encendido electrónico donde la Unidad de Control se encarga de abrir y cerrar el circuito primario, con base en la información que le llega de los sensores indicándole las condiciones de funcionamiento del motor. (10)

### 2.6.3. Generación de rayos X

El sistema de funcionamiento de un generador de rayos X tiene un funcionamiento relativamente básico. El equipo recibe electricidad desde la corriente doméstica, esta corriente puede ser de 220 V a 440 V, es recibido por un transformador de baja tensión que es reductor y que baja el voltaje a 5 o 10 v, lo cual va a producir incandescencia del filamento, generando liberación de electrones. Estos electrones son centralizados por la copa centralizadora de Molibdeno, y que se quedan ahí, en el filamento de tungsteno, esperando.

Cuando el equipo se dispara, con el cronorruptor, se activa el circuito de alta tensión que tiene un transformador amplificador, lo que genera un aumento de voltaje a 70Kv. Al ser tan grande la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo va a generar una gran diferencia de potencial y los electrones salen disparados al ánodo.

Los electrones se dirigen al ánodo y chocan contra una barra de tungsteno. Cuando se activa el circuito de baja tensión, no se liberan los electrones; quedan en el filamento de tungsteno.



**Figura 2.17:** Tubo de rayos x

Las aplicaciones de estos tubos de rayos x son bastas y han sido un gran avance tecnológico para la humanidad. La generación de rayos x mediante voltaje tiene sus pros y sus contras respecto a generación de rayos x por isotopos radiactivos, ya que los tubos de rayos x pueden ser apagados cuando el equipo no esta operando, en cambio el isótopo radiactivo estará permanentemente irradiando, perdiendo intensidad con el pasar del tiempo.

## Capítulo 3

# Metodología

En este capítulo se expone todo el desarrollo de la fuente de alto voltaje en cuestión; diseño del sistema, fabricación del sistema, diseño del firmware del micro controlador, implementación y por último el método experimental.

El sistema esta compuesto por dos partes, hardware y firmware, el hardware se compone de tres partes como vemos en la figura 3.5: parte digital de control, inversor de voltaje y rectificador multiplicador.

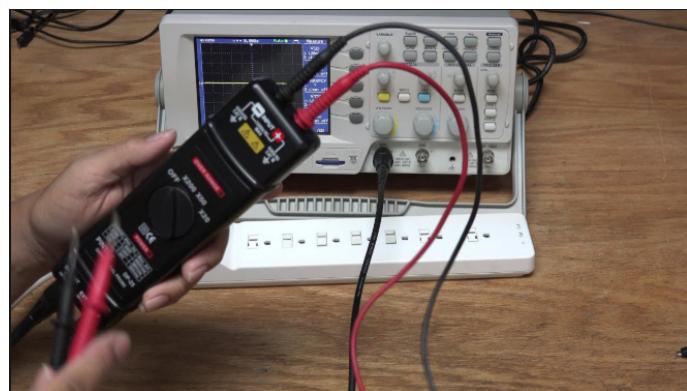
Por otro lado el firmware consiste en los programas que realizan el control completo de la generación de alto voltaje por medio del desarrollo de un ambiente gráfico al que el usuario tiene acceso, control para el senseo de voltajes, corrientes y protecciones necesarias para el correcto funcionamiento del sistema en general, así como también un control para el inversor de voltaje, mediante la implementación de

### 3. METODOLOGÍA

un ADC ( Analog to Digital Converter) a la salida de una devanado de baja en el transformador de alto voltaje el cual controla la salida de alto voltaje. Observemos de manera gráfica la topología del sistema en la figura 3.5S.

### 3.1. Materiales utilizados

La medición y comprobación del alto voltaje no es tan sencilla si no se tienen las herramientas necesarias para ello. La utilización de osciloscopios (figura 3.3), voltímetros (figura 3.2) y sistemas de medición se ve afectado debido a que en su mayoría los voltajes soportados por los equipos son apenas de unos cuantos miles de volts. Es por ello que en este proyecto se han requerido herramientas como lo son las sondas divisoras de voltaje, similar a la que se aprecia en la figura 3.1, permitiendo así la utilización de las herramientas antes comentadas aquí.



**Figura 3.1:** Sonda de alto voltaje

Con esta herramienta se ha logrado utilizar el osciloscopio y analizar la señal para presentar resultados mas claros. Podemos observar el osciloscopio utilizado para las mediciones y un multímetro flu-

### 3. METODOLOGÍA

---

ke, los cuales son suficientes para determinar la eficiencia de nuestra fuente de voltaje. Teniendo en cuenta siempre la seguridad requerida para la operación de estos instrumentos.



**Figura 3.2:** Multimetro utilizado en experimento



**Figura 3.3:** Osciloscopio utilizado en experimento

Para la fabricación de los PCB se utilizó una herramienta LPKF, router computarizado. El cual, una vez hecho el diseño en el progra-

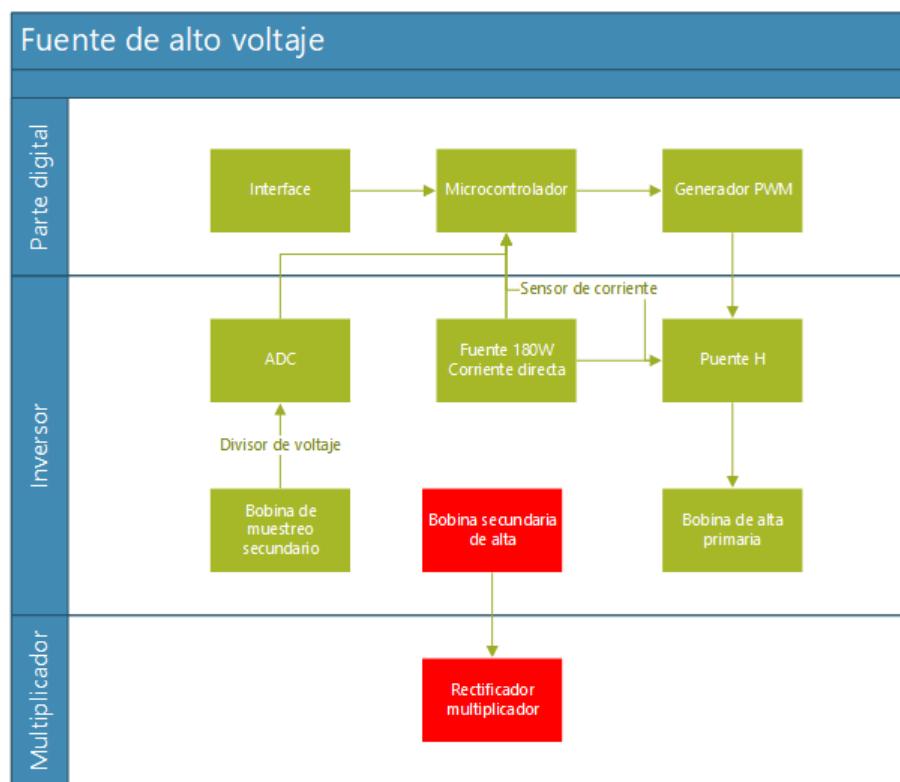
ma EAGLE se prosiguió a la generación de los archivos gerber para su posterior maquinación.



**Figura 3.4:** Router CNC

### 3.2. Diseño del hardware

La figura 3.1 muestra un diagrama a bloques de la estructura general del hardware que conforma el sistema de generación de alto voltaje, el cual esta compuesto, desde la parte superior a la inferior, primeramente por bloques relacionados con el control digital del sistema, este bloque se encarga de las interfaces para el usuario así como también de el control e instrumentación de los diferentes sensores, el siguiente conjunto de bloques representan la electrónica encargada de la inversión de voltaje y por ultimo tenemos la rectificación.



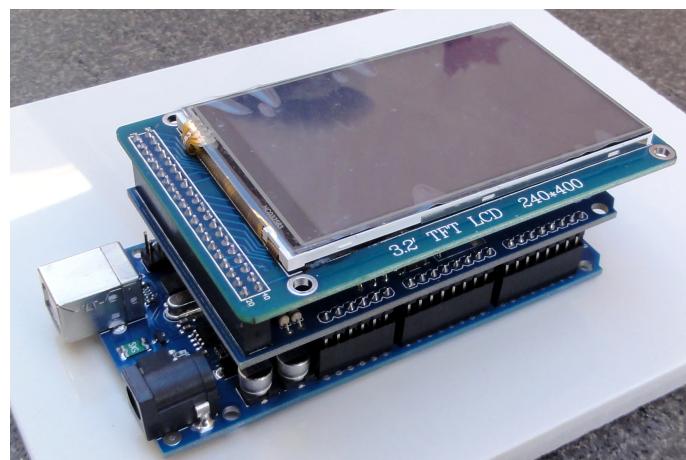
**Figura 3.5:** Topología de fuente de alto voltaje

### **3. METODOLOGÍA**

---

#### **3.2.1. Hardware de interface**

Para el desarrollo de la interface gráfica se a utilizado un microcontrolador ATMEGA2560, implementado por la facilidad de programación y los tiempos cortos para la conclusión de este proyecto, así como también la implementación de una pantalla TFT-LCD ( Pantalla de cristal líquido de transistores de película fina) y comunicación UART como interfaces gráfica al usuario. Se ha utilizado el hardware de dicha placa y ahorrado tiempo de desarrollo.



**Figura 3.6:** LCD-TFT para interface gráfica

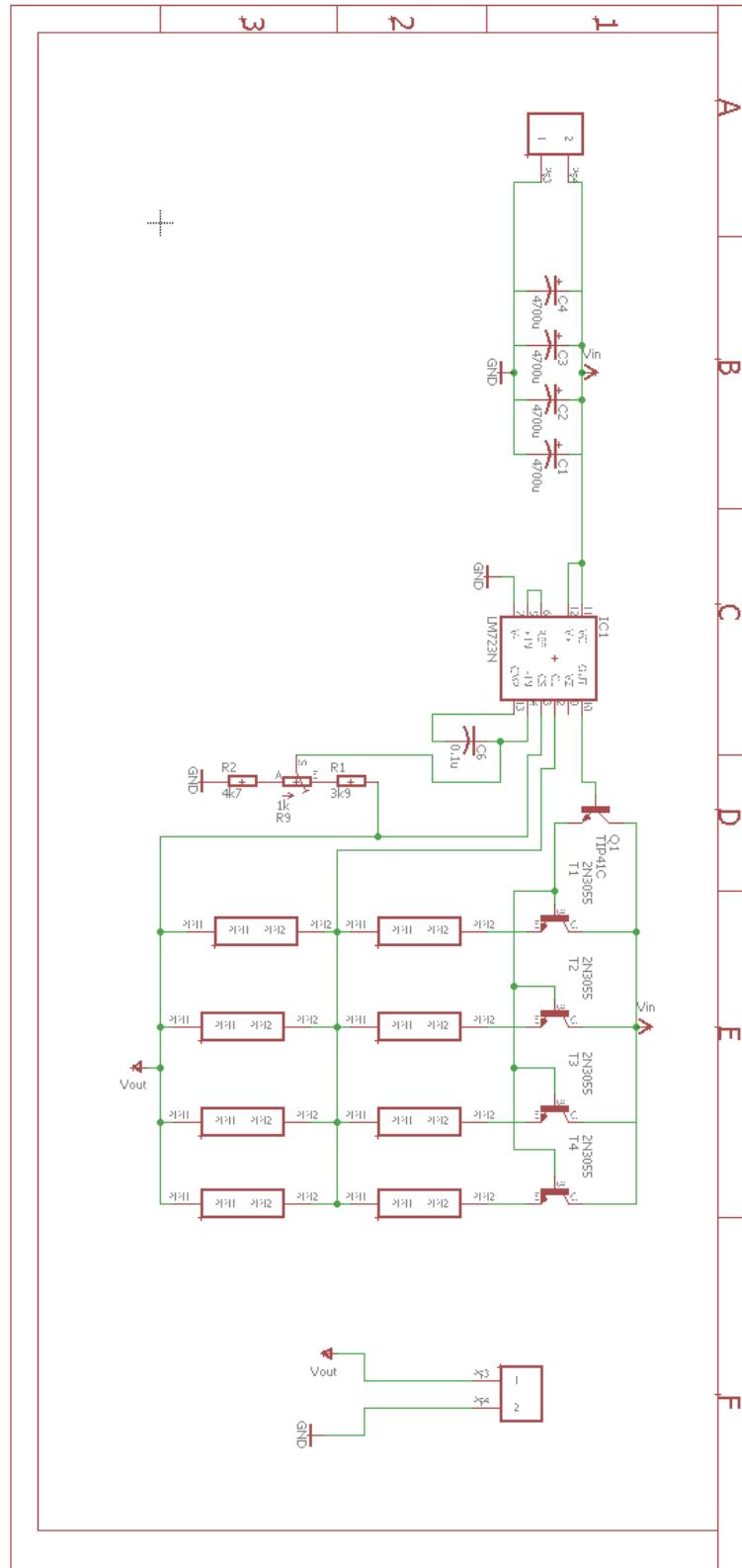
### 3.2.2. Hardware de fuente de voltaje a 180w

Esta sección consiste en varias etapas de desarrollo, para ello primero se ha desarrollado una fuente de voltaje de 180W, que es el primer circuito a analizar. Podemos observar en la figura 3.7 el diseño propuesto. El cual esta conformado por el regulador de voltaje LM723 en modalidad fuente de voltaje por modalidad de regulación positiva.

Se ha simulado esta fuente de voltaje en el programa LTSPICE como se muestra en la figura 3.8, en este punto se busca el menor rizo posible en nuestra salida final, ya que, en este punto el ruido sera amplificado cientos de veces. Podemos observar en la figura 3.9 que nuestra simulación se acerca bastante a lo buscado, una señal de 12v en corriente directa, teniendo una señal estabilizada en un tiempo de 24ms, suficientemente pequeño para la inicialización de nuestro proyecto. El diseño del PCB se encuentra en la figura 3.10, el cual fue diseñado en el programa EAGLE.

### 3. METODOLOGÍA

---



**Figura 3.7:** Simulación en LTSPICE fuente 180w

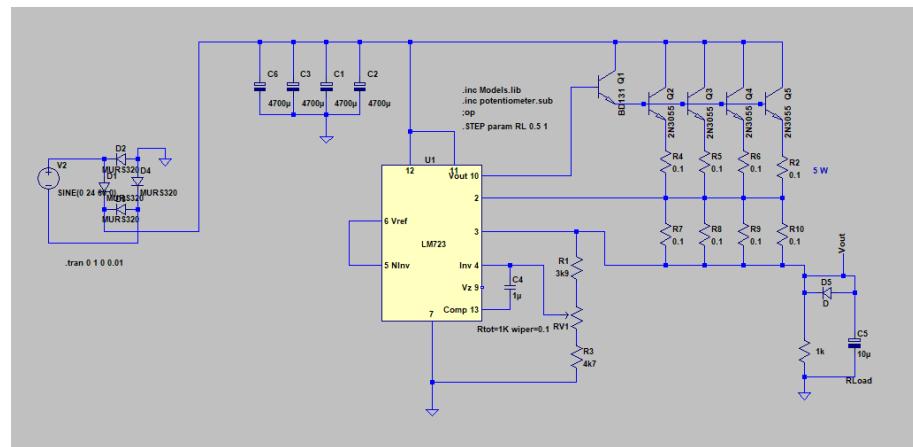


Figura 3.8: Simulación en LTSPICE fuente 180W

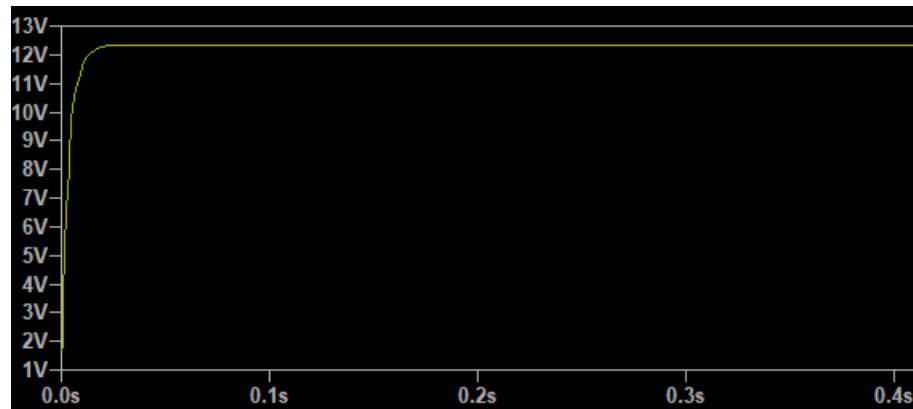
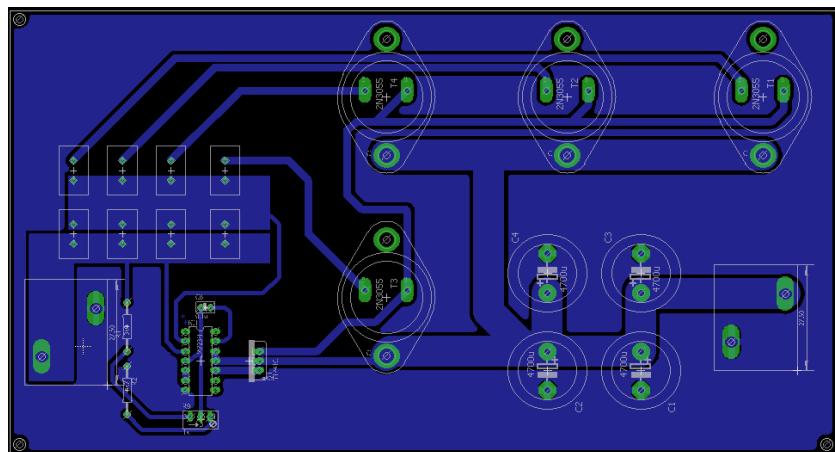


Figura 3.9: Simulación fuente regulable en LTSPICE

### 3. METODOLOGÍA

---



**Figura 3.10:** Diseño placa de fuente de regulable de 180w

### 3.2.3. Hardware inversor

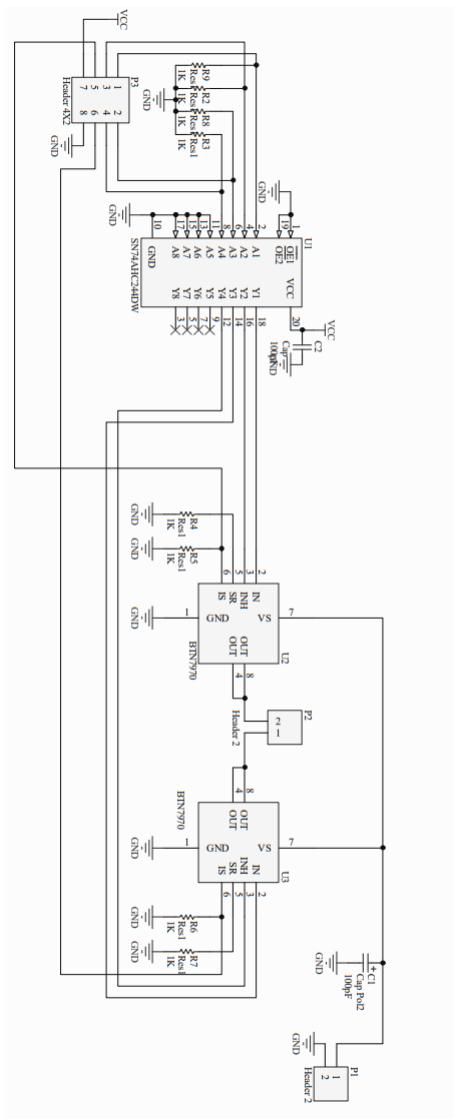
Para el inversor se ha implementado una topología del tipo puente H, ya que es una de las mas utilizadas por los desarrolladores. El integrado BTS7960B (14) es un mosfet de potencia bastante robusto y con una comunidad de desarrollo bastante grande, es por ello que se ha seleccionado este modelo entre los miles que existen en el mercado. Podemos observar el diagrama implementado en la figura 3.12 (7) y partiendo de el se ha utilizado la placa de desarrollo IBT2 (figura 3.11) por cuestión de costos.



**Figura 3.11:** Placa de desarrollo, puente H IBT-2

### 3. METODOLOGÍA

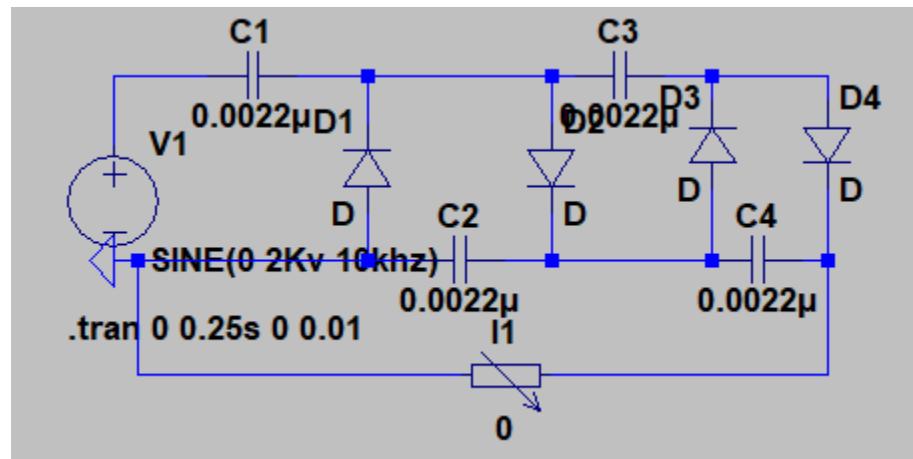
---



**Figura 3.12:** diagrama puente H

### 3.2.4. Multiplicador de voltaje Cockcroft Walton

Mediante el motor de simulación de LTSPICE se ha realizado el diseño del multiplicador a utilizar. Contando con valores de capacitores de  $0.1 \mu\text{-Faradios}$ , diodos MUR4100, voltaje de entrada de 1KV y una frecuencia variable de 10KHZ. Podemos observar en la figura 3.9 el diseño planteado, con la finalidad de tener un punto de referencia al momento de realizar el experimento.



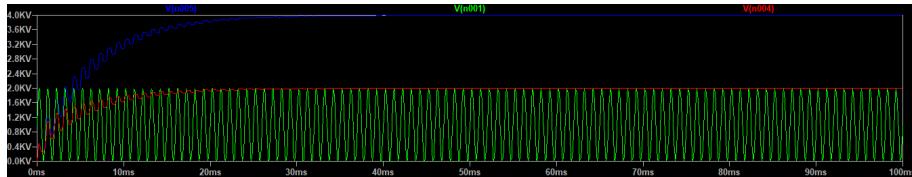
**Figura 3.13:** Multiplicador de voltaje 2 niveles

Se han realizado corridas en el simulador con cargas que exigen 1 mA, 10 mA y pruebas sin carga. Podemos observar en la figura 3.14 la salida de CD que se obtiene cuando no tenemos carga alguna, como vemos la salida esta aparentemente libre de rizo y este es el punto de referencia para medir la eficiencia de nuestra fuente. El voltaje en color rojo es la primera etapa de nuestro multiplicador, en

### 3. METODOLOGÍA

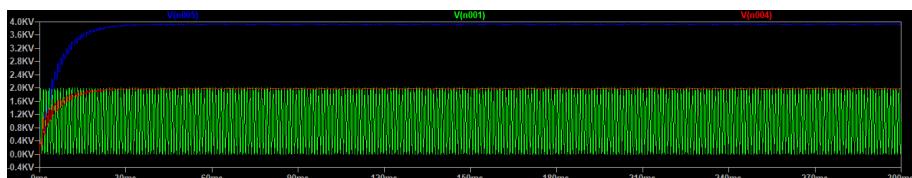
---

color azul tenemos la segunda etapa y en color verde la entrada de corriente alterna.



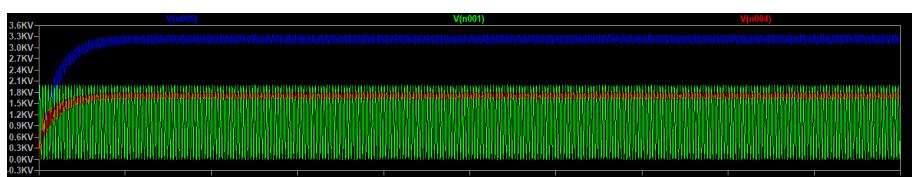
**Figura 3.14:** Multiplicador de voltaje sin carga

Para una carga con una exigencia de 1 mA podemos observar la figura 3.15. Como vemos ahora el rizo y la caída en el voltaje es perceptible a simple vista.



**Figura 3.15:** Multiplicador de voltaje con 1 mA de carga

Para una carga con una exigencia de 10 mA podemos observar la figura 3.16. Tenemos una caída de voltaje bastante significativa y un rizo bastante pronunciado.



**Figura 3.16:** Multiplicador de voltaje con 10 mA de carga

Tenemos un voltaje  $V_{1mA} = 3.9KV$ ,  $V_{10mA} = 3.2KV$  y  $V_{NL} = 4KV$  ahora utilizando la ecuación 2.7 podemos calcular la eficiencia

de nuestra fuente y utilizar este punto de referencia para la construcción de nuestro proyecto. Para una carga de 1 mA tenemos  $VR_{1mA} = 2.5\%$  Y para una carga de 10 mA  $VR_{10mA} = 20\%$  valor límite para nuestro circuito.

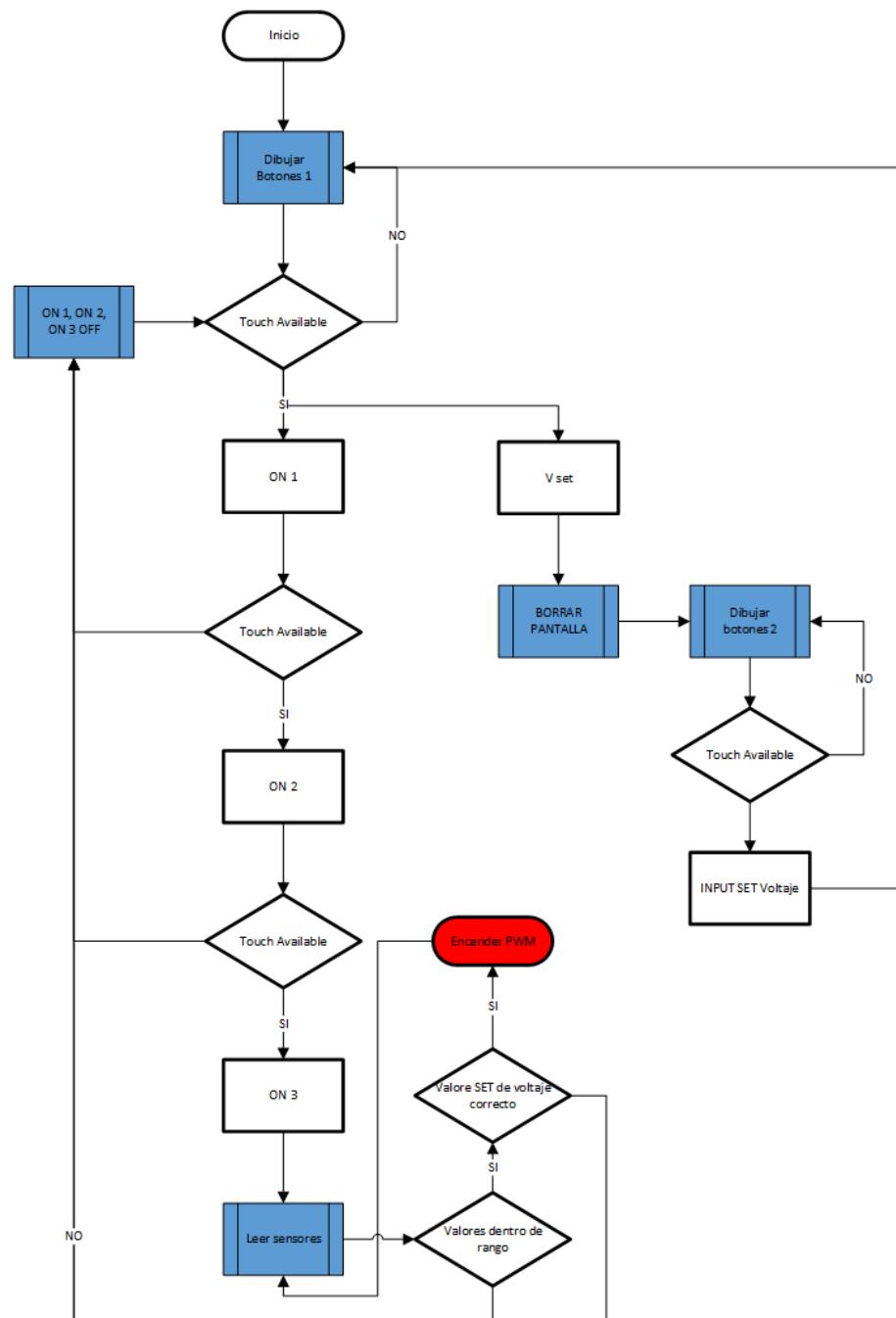
### 3.3. Firmware

#### 3.3.1. Interface gráfica

Para el desarrollo de la interface gráfica se ha realizado en el ambiente de programación de Arduino, intentando la utilización de la menor cantidad de librerías de autoría no propia y siguiendo algunas reglas de programación básicas para micro-controladores como lo es la no utilización de los comando delay. Dicho código se divide en varias secciones, para el cual solo se utilizaron las siguientes librerías:

```
#include <UTFT.h>
#include <URTouch.h>
```

En la siguiente figura podemos observar la topología del firmware que se ha desarrollado.



**Figura 3.17:** Multiplicador de voltaje con 10 mA de carga

El microcontrolador cuenta con múltiples salidas que permiten una comunicación con el Hardware desarrollado, se han definido las si-

### 3. METODOLOGÍA

guientes variables, salidas y entradas del micro controlador.

```
void setup(){

    myGLCD.InitLCD();
    myGLCD.clrScr();
    myTouch.InitTouch();
    myTouch.setPrecision(PREC_HI);
    Serial.begin(9600);
    Serial.setTimeout(50);

}

//Definimos fuentes que utilizaremos
extern uint8_t SmallFont[];
extern uint8_t BigFont[];
extern uint8_t SevenSegNumFont[];

//variables que estaremos utilizando
int x,y,pantalla=1,k,voltaje=1,p=0,p1=0,p2=0,p3=0,vout=0;
char dato[20];

//variables para tomar datos de UART
```

```
String str = "";  
  
const char separator = ',', ;  
  
const int dataLength = 2;  
  
int data[dataLength];  
  
char vin[20];  
  
char current[20];
```

Como vemos se ha utilizado la función setTimeout, configuración de la comunicación serial, necesaria en el proyecto para mantener un eneo de datos sin riesgos a perdida de informacion debido a los subprocessos que se realizan dentro del firmware diseñado. SetTimeout() establece los milisegundos máximos para esperar los datos de transmisión, por defecto es de 1000 milisegundos. Esta función es parte de la clase Stream y es llamada por cualquier clase que hereda de ella (Wire, Serial, etc.). (8)

Todo el código esta dividido en funciones, las cuales llamamos en nuestro LOOP, tratando siempre de cumplir con las siguientes características: no utilización de la función delay, no utilización de ciclos que dependa de alguna condición externa, utilizar el menor código posible para una acción. Las funciones que se utilizaron para la el

### 3. METODOLOGÍA

despliegue de información de la primera pantalla fue el siguiente:

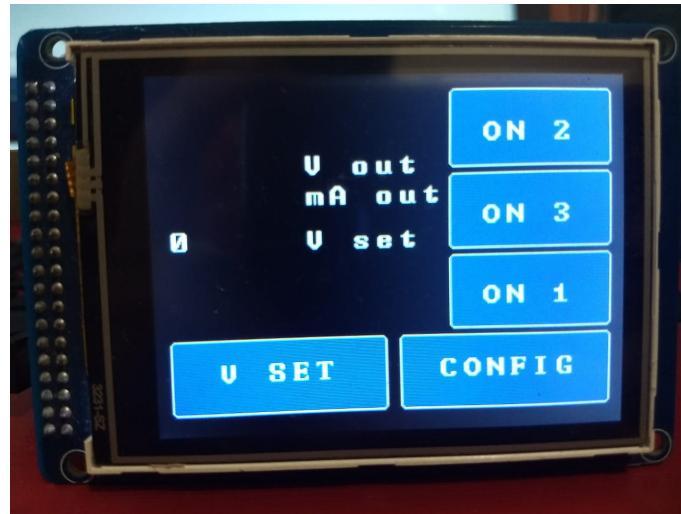
```
void botones1(){  
    myGLCD.setFont(BigFont);  
    for (x=0; x<3; x++)  
    {  
  
        myGLCD.setColor(0, 0, 255);  
        myGLCD.fillRoundRect (200, 10+(x*55), 310, 60+(x*55));  
        myGLCD.setColor(255, 255, 255);  
        myGLCD.drawRoundRect (200, 10+(x*55), 310, 60+(x*55));  
    }  
    for (x=0; x<2; x++)  
    {  
  
        myGLCD.setColor(0, 0, 255);  
        myGLCD.fillRoundRect (10+(x*155), 175, 155+(x*155), 225);  
        myGLCD.setColor(255, 255, 255);  
        myGLCD.drawRoundRect (10+(x*155), 175, 155+(x*155), 225);  
    }  
}
```

```
myGLCD.setBackColor(0, 0, 255);  
myGLCD.print("ON 2", 220 , 30);  
myGLCD.print("ON 3", 220 , 85);  
myGLCD.print("ON 1", 220 , 140);  
//myGLCD.print("UART ON", 185 , 195);  
myGLCD.print("V SET", 40 , 190);  
myGLCD.print("CONFIG", 190 , 190);  
}  
  
void marco1(int x1, int y1, int x2, int y2){  
  
    myGLCD.setColor(255, 0, 0);  
    myGLCD.drawRoundRect (x1, y1, x2, y2);  
  
    while (myTouch.dataAvailable())  
        myTouch.read();  
    myGLCD.setColor(255, 255, 255);  
    myGLCD.drawRoundRect (x1, y1, x2, y2);  
}
```

Mediante el código anterior podemos, con ciertas variables, dibujar nuestra área de trabajo en la pantalla, obteniendo como resultado el dibujo de la figura 3.19.

### 3. METODOLOGÍA

---



**Figura 3.18:** Pantalla 1

Mediante esta configuración de dibujo partimos para el código de configuración del TOUCH para lo que llamamos la “pantalla 1”.

```
void touch1(){  
    myTouch.read();  
    x=myTouch.getX();  
    y=myTouch.getY();  
    if((x>=200) && (x<=310))  
    {  
        if((y>=10) && (y<=60)){ //boton ON 2  
            marco1(200,10,310,60);  
        }  
  
        if((y>=65) && (y<=115)){ //boton ON 3  
            marco1(200,65,310,115);  
        }  
    }  
}
```

```
    marco1(200,65,310,115);  
}  
  
if((y>=120) && (y<=170)){ //boton ON 1  
    marco1(200,120,310,170);  
}  
}  
  
if((y>=175) && (y<=225))  
{  
    if((x>=10) && (x<=155)){ //boton V SET  
  
        marco1(10,175,155,225);  
        pantalla =2;  
    }  
  
    if((x>=165) && (x<=310)){ //boton config  
        marco1(165,175,310,225);  
    }  
}
```

### 3. METODOLOGÍA

Observamos que el despliegue de estas funciones solo están conformadas por elementos “if” y el llamado a funciones descritas por nosotros se despliegan de la misma manera, resaltando esto debido a que se desarrollo un código lo mas eficientemente posible en cuestión de tiempos de ejecución.

Dividimos el dibujo de la “pantalla 2” y las funciones para el touch de la pantalla dos en los siguientes codigos:

#### Funciones dibujo pantalla 2

```
void botones2(){  
    myGLCD.setBackColor(0,0,255);  
    for (x=0; x<4; x++) //botones +  
    {  
  
        myGLCD.setColor(0, 0, 255);  
        myGLCD.fillRoundRect (10+(x*60), 10, 60+(x*60), 60);  
        myGLCD.setColor(255, 255, 255);  
        myGLCD.drawRoundRect (10+(x*60), 10, 60+(x*60), 60);  
        myGLCD.print("+", 27+(x*60), 27);  
    }  
    for (x=0; x<4; x++) //botones -
```

```
{  
  
    myGLCD.setColor(0, 0, 255);  
  
    myGLCD.fillRoundRect (10+(x*60), 170, 60+(x*60), 220);  
  
    myGLCD.setColor(255, 255, 255);  
  
    myGLCD.drawRoundRect (10+(x*60), 170, 60+(x*60), 220);  
  
    myGLCD.print("-", 27+(x*60), 190);  
  
}  
  
  
for (x=0; x<4; x++) //blanco  
{  
  
    myGLCD.setColor(255, 255, 255);  
  
    myGLCD.fillRoundRect (10+(x*60), 70, 60+(x*60), 160);  
  
    myGLCD.setColor(255, 0, 0);  
  
    myGLCD.drawRoundRect (10+(x*60), 70, 60+(x*60), 160);  
  
}  
  
  
myGLCD.setColor(0, 0, 255); // boton set  
myGLCD.fillRoundRect(250,70,310,160);  
myGLCD.setColor(255, 255, 255);  
myGLCD.drawRoundRect(250,70,310,160);
```

### 3. METODOLOGÍA

---

```
myGLCD.print("set" , 255,105);  
}
```

Podemos observar el resultado del dibujo en la figura 3.19.



**Figura 3.19:** Pantalla 2

Funciones TOUCH “pantalla 2”:

```
void touch2(){  
    myTouch.read();  
    x=myTouch.getX();  
    y=myTouch.getY();  
  
    if((y>=10) && (y<=60)){ ////////////botones +  
        if((x>=10) && (x<=60)){ //boton + kilos  
            marco1(10,10,60,60);  
        }  
    }  
}
```

```
myGLCD.setFont(SevenSegNumFont);

suma(1,0,0,0,0,0);

}

if((x>=70) && (x<=120)){ //boton + centena

marco1(70,10,120,60);

suma(0,1,0,0,0,0);

}

if((x>=130) && (x<=180)){ //boton + decena

marco1(130,10,180,60);

suma(0,0,1,0,0,0);

}

if((x>=190) && (x<=240)){ //boton + unidad

marco1(190,10,240,60);

suma(0,0,0,1,0,0);

}

if((y>=170) && (y<=220)){ ////////////botones -

if((x>=10) && (x<=60)){ //boton + kilos
```

### 3. METODOLOGÍA

```
marco1(10,170,60,220);  
suma(1,0,0,0,0,1);  
  
}  
  
if((x>=70) && (x<=120)){ //boton + centena  
  
marco1(70,170,120,220);  
suma(0,1,0,0,0,1);  
  
}  
  
if((x>=130) && (x<=180)){ //boton + decena  
  
marco1(130,170,180,220);  
suma(0,0,1,0,0,1);  
  
}  
  
if((x>=190) && (x<=240)){ //boton + unidad  
  
marco1(190,170,240,220);  
suma(0,0,0,1,0,1);  
}
```

```
}

if((x>=250) && (x<=310)){ // boton SET

    if((y>=70) && (y<=160)){

        marco1(250,70,310,160);

        pantalla =1;

        if(vout >=0 && vout <=1000){

            Serial.println(vout);

        }

    }

}

}
```

Una vez que definimos las funciones a utilizar para estas dos primeras pantallas proseguimos a las funciones de cálculos y procesamiento de datos. Para ello hemos creado una función capaz de configurar el voltaje de salida, manteniendo una comunicación UART hacia un micro-controlador.

### 3. METODOLOGÍA

```
void suma(int x1,int x2,int x3,int x4, int k, int w){  
  
    myGLCD.setFont(SevenSegNumFont);  
    myGLCD.setColor(0, 0, 0);  
    myGLCD.setBackColor(255,255,255);  
    int q;  
  
    if(x1 == 1){//algoritmo kilos  
  
        if(w==0 && p<9){  
  
            vout=vout+1000;  
            p=p+1;  
            q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;  
            sprintf(dato,"%d",q)  
        }  
  
        if(w==1 && p>0){  
  
            vout=vout-1000;  
            p=p-1;  
            q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;  
        }  
    }  
}
```

```
sprintf(dato,"%d",q);  
}  
  
myGLCD.print(dato,20*x1+80*x2+140*x3+200*x4,90);  
}  
  
if(x2 == 1){ //algoritmo centena  
  
    if(w==0 && p1<9){  
  
        vout=vout+100;  
        p1=p1+1;  
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;  
        sprintf(dato,"%d",q);  
    }  
  
    if(w==1 && p1>0){  
  
        vout=vout-100;  
        p1=p1-1;  
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;  
        sprintf(dato,"%d",q);  
    }  
}
```

### 3. METODOLOGÍA

```
    }  
  
    myLCD.print(dato,20*x1+80*x2+140*x3+200*x4,90);  
}  
  
if(x3 == 1){//algoritmo decenas  
    if(w==0 && p2<9){  
  
        vout=vout+10;  
        p2=p2+1;  
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;  
        sprintf(dato,"%d",q);  
    }  
  
    if(w==1 && p2>0){  
  
        vout=vout-10;  
        p2=p2-1;  
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;  
        sprintf(dato,"%d",q);  
    }  
  
    myLCD.print(dato,20*x1+80*x2+140*x3+200*x4,90);
```

```
//Serial.println(vout);  
  
}  
  
  
if(x4 == 1){//algoritmo unidades  
    if(w==0 && p3<9){  
  
        vout=vout+1;  
        p3=p3+1;  
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;  
        sprintf(dato,"%d",q);  
  
    }  
    if(w==1 && p3>0){  
  
        vout=vout-1;  
        p3=p3-1;  
        q=p*x1+p1*x2+p2*x3+p3*x4;  
        sprintf(dato,"%d",q);  
  
    }  
    myGLCD.print(dato,20*x1+80*x2+140*x3+200*x4,90);
```

### 3. METODOLOGÍA

```
    }

    if(k==1){

        for(x=0 ; x<4 ; x++){

            sprintf(dato,"%d",p);

            myGLCD.print(dato,20,90);

            sprintf(dato,"%d",p1);

            myGLCD.print(dato,80,90);

            sprintf(dato,"%d",p2);

            myGLCD.print(dato,140,90);

            sprintf(dato,"%d",p3);

            myGLCD.print(dato,200,90);

        }

    }

}
```

Una segunda función es la encargada de recibir los datos procedentes del segundo micro-controlador, encargado de leer los datos de sensores y preparar el funcionamiento del inversor.

```
void vinput(){
```

```
str = Serial.readStringUntil('\n');

for (int i = 0; i < dataLength ; i++)
{
    int index = str.indexOf(separator);
    data[i] = str.substring(0, index).toInt();
    str = str.substring(index + 1);
}

for (int i = 0; i < sizeof(data) / sizeof(data[0]); i++)
{

    Serial.print(data[i]);
    Serial.print('\t');
}
Serial.println();

myGLCD.setFont(BigFont);
sprintf(vin, "%d", data[0]);
sprintf(current, "%d", data[1]);
myGLCD.print("      " ,10,50);
myGLCD.print("      " ,10,70);
myGLCD.setBackColor(0,0,0);
```

### 3. METODOLOGÍA

```
    myGLCD.setColor(255,255,255);  
    myGLCD.print(vin ,10,50);  
    myGLCD.print(current ,10,70);  
}
```

Mediante las funciones anteriores podemos mantener una comunicación INPUT y OUTPUT mediante UART, con el segundo microcontrolador, y mantener un senseo de las variables necesarias para el correcto funcionamiento de la fuente de alto voltaje. Ahora mostramos en cuerpo del programa principal, encargado del control de cada una de las funciones anteriores.

```
void loop(){  
//pantalla 1  
if(pantalla == 1){  
  
    myGLCD.fillScr(VGA_BLACK);  
    botones1();  
    myGLCD.setFont(BigFont);  
    char set[25];  
    sprintf(set, "%d", vout);  
    myGLCD.setBackColor(0,0,0);  
    myGLCD.print(set ,10,100);  
    myGLCD.print("V set" ,100,100);
```

```
myGLCD.print("V out" ,100,50);
myGLCD.print("mA out" ,100,70);
myGLCD.print(vin ,10,50);
myGLCD.print(current ,10,70);

while(true)
{
    if(myTouch.dataAvailable())touch1();
    if(pantalla == 2 )break;
    if (Serial.available()>0){vinput();}

}
}

//pantalla 2
if(pantalla == 2){

    myGLCD.fillScr(VGA_BLACK);
    botones2();
    suma(0,0,0,0,1,0);
}
```

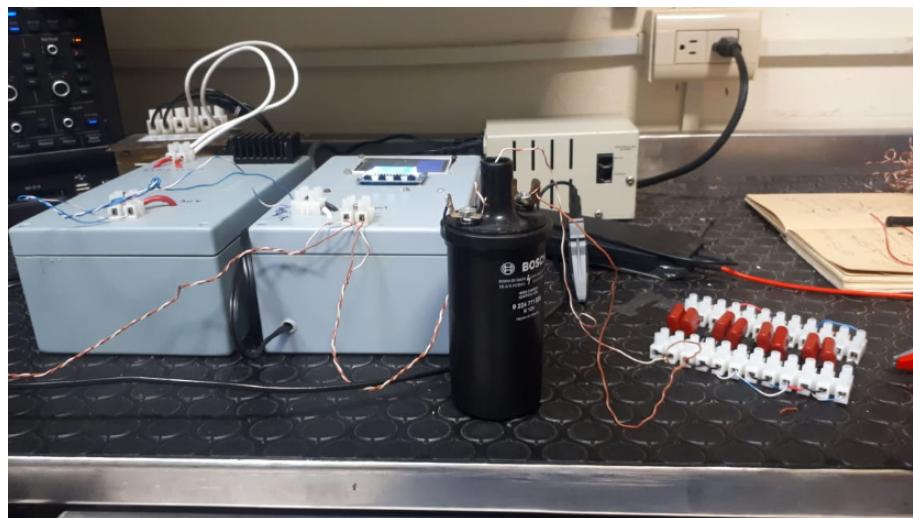
### 3. METODOLOGÍA

```
while(true)
{
    if(myTouch.dataAvailable())touch2();
    if(pantalla == 1)break;

}
}
}
```

### 3.4. Implementación del Hardware

Una vez obtenido el diseño de todas las etapas, así como también la programación del firmware se prosigue a la fabricación de los PCB de la fuente de corriente directa a 180W, el acondicionamiento de la parte digital a la etapa de potencia. Se aisló mediante una caja que solo da acceso al usuario a la parte de salidas y entradas como vemos en la imagen 3.20 Evitando así riesgos al usuario.



**Figura 3.20:** Foto del sistema en general

Una vez terminado el Hardware se hicieron pruebas de cada módulo desarrollado, con la finalidad de indicar las condiciones optimas para el sistema en general, haciendo pruebas con diferentes cargas y observando el ruido obtenido de ellos.

### 3.4.1. Fuente de 180W

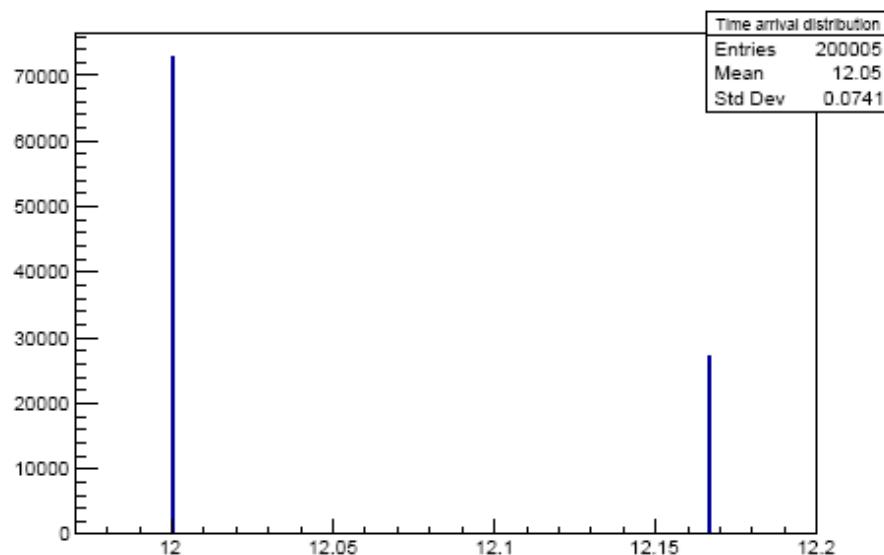
Se ha terminado la maquinación de la fuente de voltaje en el router LPKF y realizado el ensamblaje. Se tienen 180 W que pueden ser peligrosos si no se tiene el cuidado necesario, es por ello que se ha optado de aislar el circuito y dejar solamente las salidas y entradas necesarias como podemos ver en la imagen 3.21.



**Figura 3.21:** Multiplicador de voltaje sin carga

Se ha optado hacer pruebas a 12V y cargas de 7.5 OHMS, 15

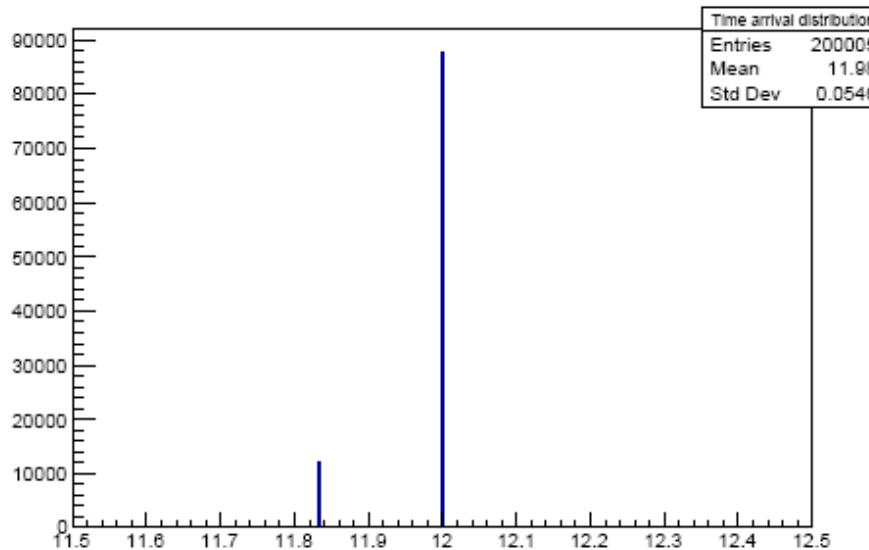
OHMS y una prueba sin carga, esperando obtener el menor ruido posible. La configuración para el experimento se puede observar en la figura 3.17. Mediante estos resultados se ha creado una gráfica gaussiana para determinar el voltaje RMS en cada experimento.



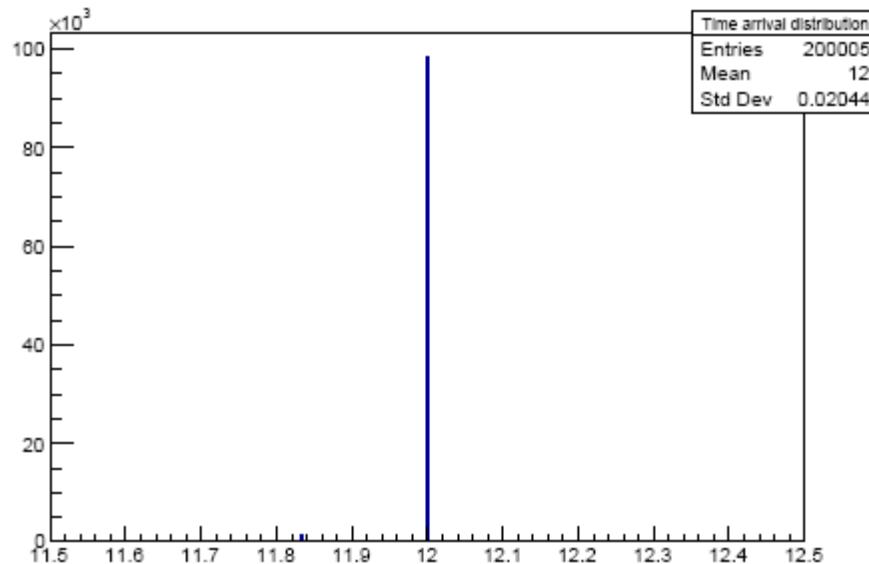
**Figura 3.22:** Fuente 12V sin carga

### 3. METODOLOGÍA

---



**Figura 3.23:** Fuente 12V con carga a 7.5 OHMS



**Figura 3.24:** Fuente 12V con carga a 15 OHMS

Como observamos nuestro RMS se mantiene desde 0.0471v sin carga a 0.0546V con una carga de 7.5 ohms o 90w, obteniendo una

regulación de voltaje de  $\%VR = 0.0627$  que significa una eficiencia del 99.93 % cuando la fuente es sometida a una carga resistiva de 90w, eficiencia bastante buena para los experimentos siguientes.

### **3.4.2. Inversor de voltaje**

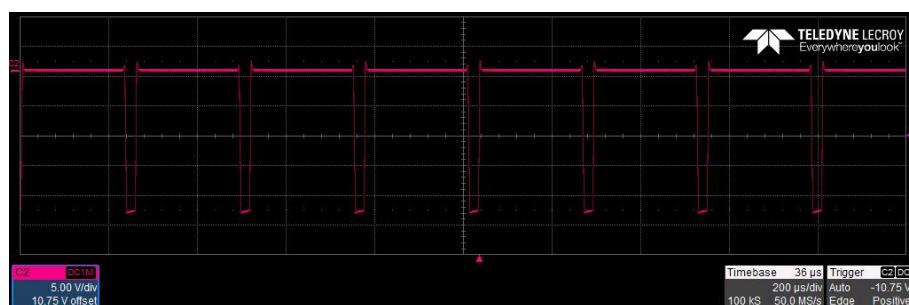
Este modulo ha sido aislado de la misma manera que se aisló la fuente de 180W (figura 3.21), debido a los riesgos que conlleva si no se tiene el cuidado pertinente. Ahora implementando la fuente desarrollada se alimenta al inversor y se hace un arreglo similar al experimento anterior, analizando en el osciloscopio la salida sin carga, con cargas de 15 OHMS y de 7.5 OHMS, variando en este caso la frecuencia de salida en 60 HZ, 1 KHZ y 6 khz.

### 3. METODOLOGÍA

---



**Figura 3.25:** Implementacion experimento inversor.



**Figura 3.26:** Implementación inversor salida con carga inductiva.

Mediante estas configuraciones se obtuvieron las mediciones que se pueden ver en las figuras para cada configuración respectivamente.

te.

### 3.4.3. Multiplicador de voltaje

Existen aspectos claves para este apartado que definirán la calidad de nuestra salida, es por ello que se han realizado pruebas variando algunos aspectos como lo son la frecuencia y el ciclo de trabajo incidente en la bobina primaria del transformador de alto voltaje. Podemos observar el circuito desarrollado (figura 3.27) y mediante mediciones sin carga se observa el voltaje de salida con el osciloscopio (figura 3.24)



**Figura 3.27:** Implementación inversor

### 3. METODOLOGÍA

---



**Figura 3.28:** Implementación inversor

## Capítulo 4

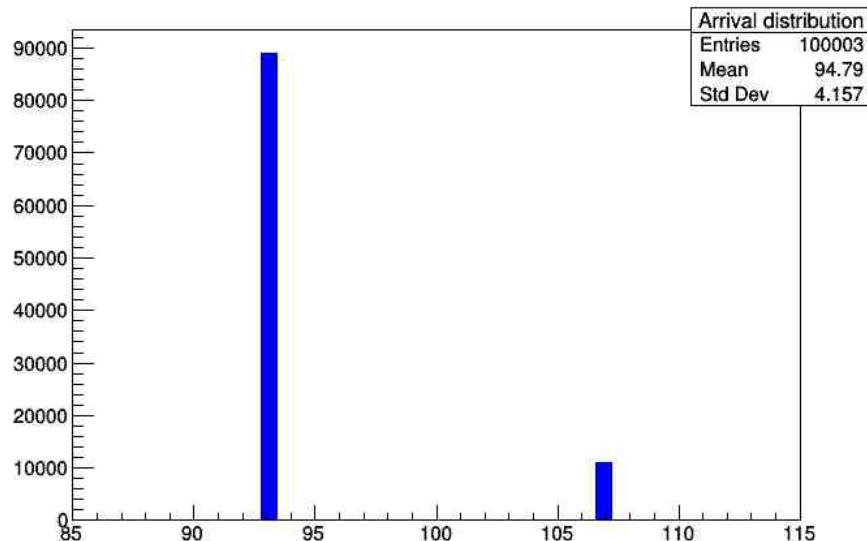
# Análisis de Resultados

### **4.1. Resultados**

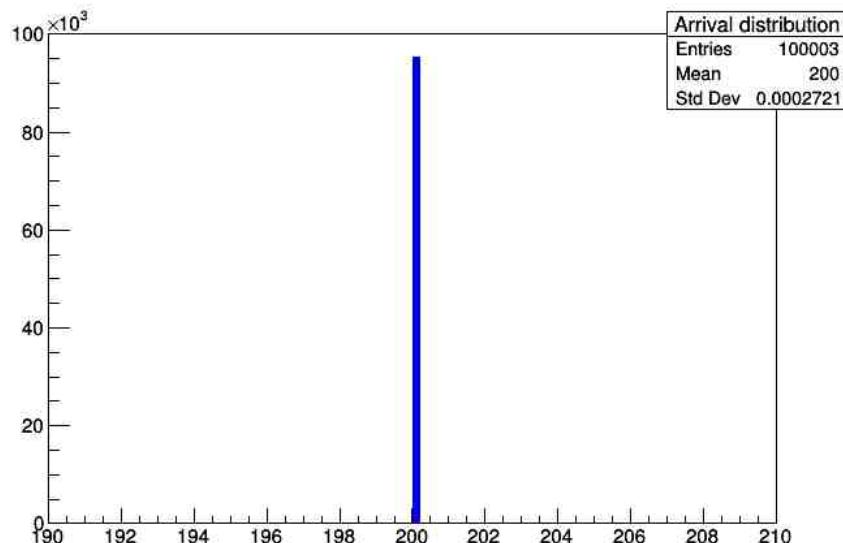
Se ha logrado mediante la implementación de un sistema de inversor de voltaje alcanzar voltajes de hasta 2 KV a una potencia de 40w, voltaje controlado digitalmente por un computador. Se ha desarrollado un código en root CERN para encontrar el voltaje RMS de nuestro voltaje de salida. Nuestras mediciones realizadas arrojaron las siguientes distribuciones para diferentes voltajes sin carga alguna.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

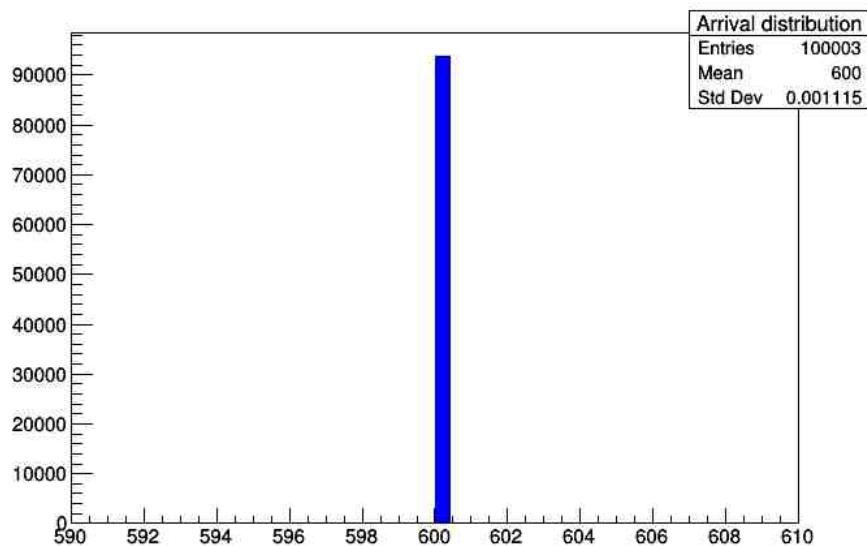
---



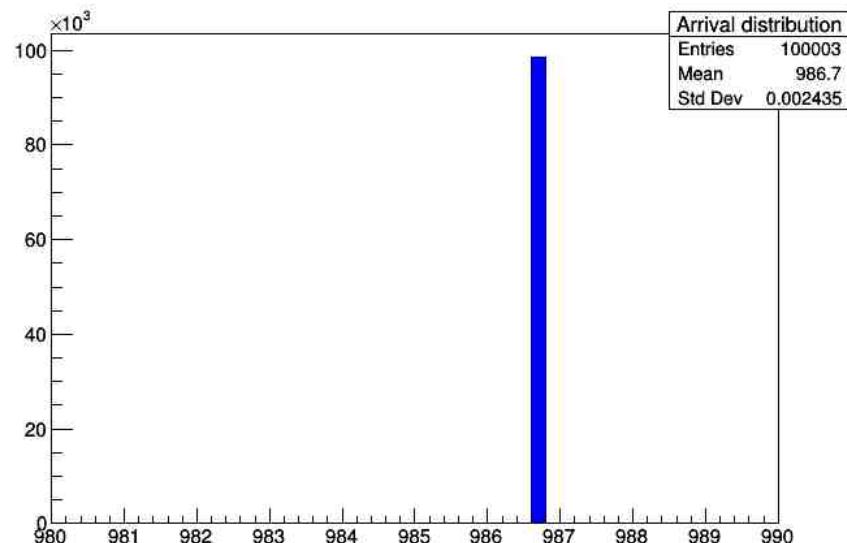
**Figura 4.1:** Salida alto voltaje sin carga a 93v.



**Figura 4.2:** Salida alto voltaje sin carga a 200v.



**Figura 4.3:** Salida alto voltaje sin carga a 600v.



**Figura 4.4:** Salida alto voltaje sin carga a 986v.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como observamos se ha obtenido voltajes sin perturbaciones y con un muy bajo ríos asociado a él. Se realizaron diez mil mediciones por cada distribución y a partir de ella podemos observar un voltaje RMS de 4.15v a 93v, 0.00027v para 200v, 0.0011v para 600v y 0.0024v para 986v respectivamente.

Utilizando la ecuación 2.6 podemos calcular el ríos asociado a la señal. Se observa en la tabla los siguientes resultados de nuestras mediciones con sus variables correspondientes.

Voltaje	Frecuencia	Duty	Ríos
93	0.0	0.0	0.0
200	0.0	0.0	0.0
600	0.0	0.0	0.0
986	0.0	0.0	0.0

Los resultados indican que se ha desarrollado una fuente con requerimientos suficientes para trabajos de laboratorio.

## Capítulo 5

# Conclusiones

Se logro la construcción satisfactoria de una fuente de alto voltaje controlada digitalmente mediante un computador y de forma manual mediante un microcontrolador integrado. Los voltajes alcanzados fueron mas de 2KV, limitados por un con una potencia de hasta 40W y un riso en el orden de micro volts.



# Bibliografía

- [1] Línea de luz Sincrotrón en México Acelerador lineal de electrones. <https://www.fis.cinvestav.mx/~sincrotron/downloads/ProyectoLNLS5.pdf> 3
- [2] Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. FUSIÓN NUCLEAR. <http://www.inin.gob.mx/temasdeinteres/fusionnuclear.cfm> 4
- [3] Standard for Determining Current-Carrying Capacity In Printed Board Design. <http://electronica.ugr.es/~amroldan/cursos/2014/pcb/modulos/temas/IPC2152.pdf> 16
- [4] Trasformadores. Miguel Angel Rodríguez Pozueta Doctor Ingeniero Industrial <http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Trafos.pdf> 25
- [5] Rectificador de onda completa. Prof. Julima Anato [http://paginas.fisica.uson.mx/horacio.munguia/aula\\_virtual/Cursos/Instrumentacion%20I/Documentos/Circuitos\\_Rectificadores.pdf](http://paginas.fisica.uson.mx/horacio.munguia/aula_virtual/Cursos/Instrumentacion%20I/Documentos/Circuitos_Rectificadores.pdf) 26
- [6] Multiplicador de voltaje utilizado en CERN en el año 1964. <http://cds.cern.ch/record/43889> 34
- [7] Esquematico de control BTN7970. <https://www.elecrow.com/download/IBT-2%20Schematic.pdf> 57
- [8] Función de velocidad para comunicación serial. <https://www.arduino.cc/en/Reference/StreamSetTimeout> 65
- [9] ACELERADORES DE PARTICULAS. Dr. EDUARDO ANDRADE <http://www.nucleares.unam.mx/~bijker/emfn/Andrade.pdf> 15
- [10] “ANÁLISIS DE INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE ENCENDIDO SIN DISTRIBUIDOR (DIS)”. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3995/1/T-ESPEL-0212.pdf> 42
- [11] University of Utah Marriott Library Special Collections. Archived from the original on 2013-10-21. Retrieved 2007-07-05. [https://wayback.archive-it.org/all/20131021170353/http://content.lib.utah.edu/cdm/ref/collection/UU\\_EAD/id/2160](https://wayback.archive-it.org/all/20131021170353/http://content.lib.utah.edu/cdm/ref/collection/UU_EAD/id/2160) 38
- [12] FUSIÓN NUCLEAR. <http://www.inin.gob.mx/temasdeinteres/fusionnuclear.cfm> 38
- [13] Biografia Michael Faraday. <http://dcb.fi-c.unam.mx/CoordinacionesAcademicas/FisicaQuimica/ElectricidadMagnetismo/biografias/5%20Michael%20Faraday.pdf> 23

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [14] BTS 7960 High Current PN Half Bridge NovalithIC. [http://www.robotpower.com/downloads/BTS7960\\_v1.1\\_2004-12-07.pdf](http://www.robotpower.com/downloads/BTS7960_v1.1_2004-12-07.pdf) 57